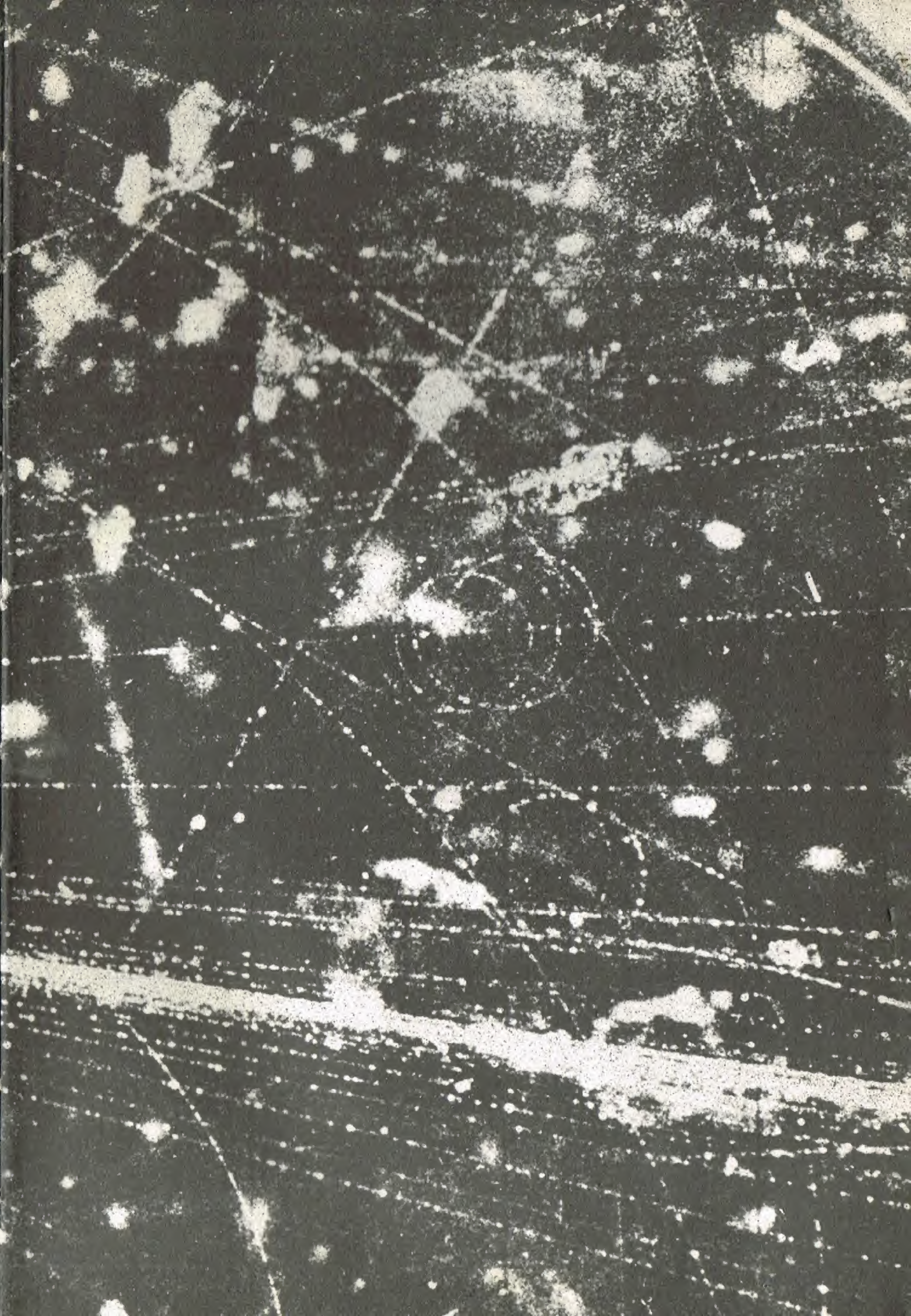



6









ENCICLOPEDIA METÓDICA
LAROUSSE

INDUSTRIA ARGENTINA

ENCICLOPEDIA

EDITORIAL LAROUSSE, 17, RUE DU MONTPARNASSE, PARÍS - VI

adaptación
hispanoamericana
del
GRAND MÉMENTO
dirigido por
Paul AUGÉ

METÓDICA

6

LAROUSSE

en seis volúmenes

publicada bajo
la dirección de Ramón
GARCÍA-PELAYO y GROSS
miembro correspondiente de la Academia de San Dionisio de Ciencias, Artes y Letras, de la Academia Boliviana de la Historia, del Instituto Gonzalo Fernández de Oviedo del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, de la Real Academia de Bellas Artes de San Telmo, de la Real Academia Hispanoamericana, y del Seminario de Estudios Americanistas

VALENTÍN GÓMEZ, 3530 BUENOS AIRES R. 13
MARSELLA 53, ESQ. NÁPOLES, MÉXICO 6, D.F.

El presente volumen corresponde a la *última edición* (revisada y corregida) de esta obra. La fecha del *copyright* más abajo mencionada no concierne sino al depósito, en Washington, de la primera edición.

ÍNDICE GENERAL

química

QUÍMICA GENERAL

por A. Belot, R. Panico y X. Martínez Garaygordóbil

QUÍMICA MINERAL

metaloides

por R. Touren

metales

por D. Tombeck, F. Boulanger y X. Martínez Garaygordóbil

QUÍMICA ORGÁNICA

por R. Panico, J. Rigaudy y X. Martínez Garaygordóbil

APLICACIONES DE LA QUÍMICA

por A. Guillemonat

industrias inorgánicas 344

industrias orgánicas 357

LÁMINAS FUERA DE TEXTO

AUTORES

ACQUARONI (José Luis).

ALVAJAR (César).

ARANGUREN (José Luis L.), doctor en Filosofía, catedrático de Ética de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Madrid.

ARGÚAS (Margarita), juez de la Cámara Nacional de Apelaciones en lo Civil de la Capital Federal, profesora adjunta a cargo de la cátedra titular de Derecho Internacional Privado de la Universidad Nacional de Buenos Aires.

AUBOYER (Jeannine), conservador del museo Guimet, de París.

BABELON (Jean), doctor en Letras, profesor de la Escuela del Louvre, ex miembro del Instituto de Altos Estudios Hispánicos de París.

BAHON (Jean), catedrático de Geografía e Historia, profesor en el Instituto Louis-le-Grand, de París.

BALLESTEROS GAIBROIS (Manuel), doctor en Filosofía y Letras, doctor en Etnología, Antropología y Lingüística americanas, catedrático de Historia de América Prehispánica en la Universidad de Madrid, director del Seminario de Estudios Americanistas, correspondiente de la Real Academia de la Historia de Madrid, miembro de honor de las Academias de Geografía e Historia de La Paz, Lima y Buenos Aires.

BARBAGELATA (Hugo D.), miembro correspondiente del Instituto Histórico y Geográfico del Uruguay, miembro de la Academia Nacional de Letras del Uruguay, delegado permanente del Uruguay en la U. N. E. S. C. O.

BARDY (canónigo Gustave), doctor en Teología y doctor en Letras.

BARÓN CASTRO (Rodolfo), miembro numerario de la Academia Salvadoreña de la Historia, correspondiente de la Real Academia de la Historia de Madrid, miembro numerario de la Academia Salvadoreña de la Lengua, correspondiente de la Real Academia Española, vicepresidente del Consejo Ejecutivo de la U. N. E. S. C. O.

BARRERA (Isaac J.), director de la Academia Ecuatoriana de la Lengua, titular de la Sección de Historia de la Casa de la Cultura Ecuatoriana, correspondiente de la Real Academia Española, de la Real Academia de la Historia de Madrid y de las Academias de la Historia de Buenos Aires, Venezuela y Chile.

BARY (P), ingeniero E. P. C.

BAUDRILLART (André), ex miembro de la Escuela Francesa de Roma, catedrático de Letras.

BERNARD (Roger), antiguo alumno de la Escuela Normal Superior, profesor de la Escuela Nacional de Lenguas Orientales de París.

BERTIN (Léon), antiguo alumno de la Escuela Normal Superior de París, catedrático de Ciencias Naturales, doctor en Ciencias, profesor en el Museo de Historia Natural de París.

BIELSA (Rafael), profesor titular de Derecho Administrativo de la Universidad Nacional de Buenos Aires, doctor *honoris causa* de la Universidad de París, miembro del Instituto Internacional de Derecho Público, de París, y del Instituto Internacional de Ciencias Administrativas, de Bruselas.

BONNAULT (Claude de), licenciado en Letras y en Derecho, consejero histórico de la prov. de Quebec.

BOST (pastor Ch.).

BOUCAU (Henri), catedrático de Historia y Geografía, ex Inspector de Instrucción Pública.

BOUCHENY (Gaston), profesor honorario del colegio Sainte-Barbe.

BOULANGER (Françoise), doctora en Ciencias Físicas, profesora auxiliar en la Facultad de Ciencias de la Universidad de París.

BOULGAKOFF (arcipreste Sergio), ex profesor de la Universidad de Moscú, profesor del Instituto Ruso de Teología Ortodoxa.

BRÉHIER (Émile), miembro del Instituto de Francia.

BRONARSKI (J.), profesor de la Universidad de Friburgo (Suiza).

CABALLERO BONALD (J. M.), ex profesor de Literatura Española e Hispanoamericana en la Universidad Nacional de Colombia.

CABRAL (Julio E.), jefe de Asuntos Administrativos de la Municipalidad de la Ciudad de Buenos Aires, vocal de la Comisión del Código de la Edificación, jefe de Trabajos Prácticos de Derecho Administrativo de la Universidad Nacional de Buenos Aires.

CABRAL (Luis Carlos), juez de la Cámara de Apelaciones en lo Criminal de Buenos Aires, profesor titular de Derecho Penal de la Universidad Católica de Buenos Aires, profesor adjunto de Derecho Penal de la Universidad Nacional de Buenos Aires.

CABRERO FERNÁNDEZ (Leoncio), profesor de la Universidad de Madrid, subdirector del Seminario de Estudios Americanistas de Madrid, miembro del Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

CÁCERES LARA (Víctor), socio activo de la Sociedad de Geografía e Historia de Honduras, académico de número de la Academia Hondureña de la Lengua, correspondiente de la Real Academia Española, catedrático de Historia Nacional en el Curso de Ciencias Básicas de la Universidad Autónoma de Honduras.

CARVALHO (Carlos Delgado de), catedrático de Geografía en el Colegio Pedro II, profesor de Historia en la Facultad Nacional de Filosofía, Ciencias y Letras de la Universidad del Brasil.

CASTRO (Therezinha de).

CENTURIÓN (Carlos R.), doctor en Derecho y Ciencias Sociales en la Universidad de Asunción, presidente del Instituto Paraguayo de Letras, miembro de la Academia Paraguaya de la Lengua Española, correspondiente de la Real Academia Española y de las Reales Academias de la Historia y de Ciencias Morales y Políticas de Madrid.

CLERC (Charly), profesor de Literatura Francesa en la Escuela Politécnica Federal de Zürich.

COISCOU HENRÍQUEZ (Máximo), profesor de Metodología y Crítica Históricas, y de Historia Nacional Dominicana en la Universidad de Santo Domingo.

COLOMBIER (Pierre du), crítico de arte.

COQUELIN (Louis).

CORAL-RÉMUSAT (condessa *de*), del Museo Guimet de París.

CORTÁZAR (Roberto), doctor en Filosofía y Letras, ex catedrático de Lenguas Latina y Griega, ex presidente de la Academia Colombiana de la Historia.

COTO CONDE (José Luis), miembro de la Academia Costarricense de la Historia, correspondiente de varias Academias de la Historia hispanoamericanas.

CRUZ HERNÁNDEZ (Miguel), doctor en Filosofía, catedrático de la Universidad de Salamanca.

CUVILLIER (Armand), antiguo alumno de la Escuela Normal Superior, catedrático de Filosofía.

CUZACQ (René), catedrático de Historia y Geografía, profesor en el Instituto de Bayona.

CHAPOT (Victor), doctor en Letras, miembro de la Escuela Francesa de Atenas.

CHEBATAROFF (Jorge), profesor de las facultades de Humanidades y Ciencias, de Ciencias Económicas y Administración, y del Instituto de Profesores de Montevideo.

DALBANNE (Jacques), diplomado de la Escuela Superior de Electricidad de París, ingeniero de la Escuela Central de París.

DAVID (Pierre).

DEFFONTAINES (Pierre), director del Instituto Francés de Barcelona, profesor de la Universidad Laval (Quebec).

DEHÉRAIN (Henri), conservador honorario de la Biblioteca del Instituto de Francia.

DELAPORTE (Louis), del Museo del Louvre, profesor del Instituto Católico de París.

DENY (Jean), administrador honorario de la Escuela Nacional de Lenguas Orientales de París.

DEVEALI (Mario L.), profesor de Derecho del Trabajo de la Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales de la Universidad Nacional de La Plata (Argentina).

DÍAZ MACHICAO (Porfirio), presidente de la Academia Boliviana de la Historia, secretario perpetuo de la Academia Boliviana de la Lengua, correspondiente de la Real Academia Española.

DIEHL (Charles), miembro del Instituto de Francia.

DONTOT (René), antiguo alumno de la Escuela Normal Superior de París, catedrático de Matemáticas.

DORESSE (Jean), egiptólogo.

DORESSE (Marianne), egiptóloga.

DUBOIS (Claude), secretario general de la Redacción de los Diccionarios Larousse.

DUFOURCQ (Albert), profesor honorario de la Facultad de Letras de la Universidad de Burdeos.

DUHAMEL (Michel), ingeniero geógrafo, antiguo alumno de la Escuela Politécnica de París.

DUMONT-WILDEN (Louis), miembro de la Real Academia de Bélgica.

ELGUERA (Alberto), director general de Asuntos Legales de la Municipalidad de la Ciudad de Buenos Aires.

ESTEVA FABREGAT (Claudio), doctor en Historia, maestro en Etnología de la Escuela Nacional de Antropología e Historia de México, profesor de Antropología y Etnología de América y de Historia de las Religiones Primitivas de América en la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Madrid.

FERIA HARDISSON (Luis), colaborador literario de revistas y periódicos españoles e hispanoamericanos.

FERRATER MORA (José), profesor de Filosofía en Bryn Mawr College (Estados Unidos).

FERREIRA GUBETICH (Hugo), profesor de Geografía en el Colegio Nacional de Asunción.

FIALLOS GIL (Mariano), rector de la Universidad Nacional de León (Nicaragua), vocal del Comité Ejecutivo de la Unión de Universidades de América Latina, ex presidente del Consejo Superior Universitario Centroamericano.

FONTANARROSA (Rodolfo O.), doctor en Jurisprudencia, profesor titular de Derecho Comercial en la Escuela de Derecho de Rosario (Universidad Nacional del Litoral), ex juez de la Corte Suprema de la Provincia de Santa Fe (Argentina).

FORERO (Manuel José), miembro de la Sociedad Geográfica de Colombia, profesor de la Universidad Nacional de Colombia, bibliotecario de la Academia Colombiana de la Lengua, correspondiente de la Real Academia Española, miembro de la Academia de la Historia de Bogotá.

FOSCA (François), crítico de arte.

FRANCK (Roger), catedrático de Matemáticas, ex profesor en el liceo Michelet, de París.

FRANCO DE MARÍAS (Dolores), licenciada en Filosofía y Letras.

FRÍAS VALENZUELA (Francisco), miembro de la Sociedad Chilena de Historia y Geografía, ex profesor de la Facultad de Filosofía y Educación de la Universidad de Chile.

GACHOT (François), director del Centro de Estudios Franceses de Bonn.

GAGNAIRE (Joseph), catedrático de Universidad, ex profesor del Instituto Francés de Praga.

GÁLLEGO (Julián), crítico de arte.

GANDÍA (Enrique de), miembro de la Academia Nacional de Ciencias Morales y Políticas y de la Academia Nacional de Historia de la Argentina.

GARCÍA-HERRERA (Ernesto), diplomado de la Escuela de Periodismo de Madrid.

GAUDEFROY-DEMOMBYNES (Maurice), miembro del Instituto de Francia, profesor en la Escuela de Lenguas Orientales de París.

GAUTHIER (Maximilien), crítico de arte.

GHIANO (Juan Carlos), profesor titular de Literatura Argentina y Literatura Iberoamericana de la Universidad Nacional de La Plata.

GILI GAYA (Samuel), miembro de la Real Academia Española de la Lengua.

GLANDARD (Jacques), ingeniero agrónomo.

GONZÁLEZ (Luis), investigador de El Colegio de México, profesor en la Escuela de Ciencias Políticas de la Universidad Nacional de México.

GORTER (S. de).

GOUARD (Christiane), catedrática de Matemáticas en el liceo femenino Montgrand, de Marsella.

GRELOU (Georges), catedrático de Universidad.

GROUSSET (René), de la Academia Francesa.

GUILLEMONAT (André), catedrático de Universidad y profesor en la Facultad de Ciencias de Marsella.

GUIRAND (Félix), catedrático de Letras.

HATEAU (G.).

HERBERT (Jean), *privat docent* de la Universidad de Ginebra.

HONTI (François), redactor jefe del *Monde Diplomatique*.

HUNGRÍA MORELL (José Joaquín), director del Instituto Cartográfico Universitario de Santo Domingo.

INCHÁUSTEGUI CABRAL (J. Marino), presidente de la Academia Dominicana de la Historia.

JAREÑO (Ernesto), licenciado en Letras, lector de Universidad, profesor de la Escuela de H. E. C. de París.

JARRY (E.), profesor de Historia Medieval en el Instituto Católico de París.

JOLIOT-CURIE (Frédéric), profesor del Colegio de Francia, miembro de la Academia de Ciencias y de la Academia de Medicina de París, premio Nóbel.

JOLIOT-CURIE (Irène), profesor de la Facultad de Ciencias de París, premio Nóbel.

JORDAN (Edouard), miembro del Instituto de Francia, profesor en la Facultad de Letras de la Universidad de París.

JOUCLA-RUAU (André), antiguo alumno de la Escuela Normal Superior de París, catedrático en la Universidad de Aix-en-Provence.

LABANDE (L. H.), miembro del Instituto de Francia.

LAMBERT (Élie), miembro del Instituto de Francia, profesor de la Sorbona.

LAFUE (Pierre).

LAPORTE (Marcel), catedrático de Ciencias Físicas, doctor en Ciencias.

LAROCK (V.), profesor en la Escuela de Altos Estudios de Gante.

LA VALLÉE POUSSIN (Louis de), profesor de la Facultad de Letras de la Universidad de Bruselas.

LEJEALLE (Léon), catedrático de Letras, profesor en el liceo Voltaire de París.

LÉONARD (Émile G.), jefe de estudios de la Escuela Práctica de Altos Estudios de París.

LESPINASSE (Pierre), crítico de arte.

LIBER (Maurice), gran rabino, director de la Escuela Rabínica de Francia.

LOBO DE NORIEGA (Ángel), coronel de Caballería, profesor de Matemáticas del Colegio de Huérfanos de Oficiales del Ejército, de Madrid.

LOBO GARCÍA (Luis), capitán de Caballería, diplomado de Estado Mayor.

LÓPEZ MARTÍNEZ (Héctor), subsecretario del Instituto Riva-Agüero, Escuela de Altos Estudios de la Pontificia Universidad Católica de Lima.

LÓPEZ OLACIREGUI (José María), profesor titular de Derecho Civil de la Universidad Nacional de Buenos Aires.

LUQUET (Georges-H.), doctor en Letras, catedrático de Filosofía.

MACHADO (José Manuel), profesor de Derecho y rector de la Universidad de Santo Domingo, miembro de la Academia Dominicana de la Historia y del Ateneo Dominicano.

MARÇAIS (Georges), miembro del Instituto de Francia.

MARCHESSEAU (Denise), licenciada en Letras.

MARÍAS (Julián), doctor en Filosofía, miembro del Institut International de Philosophie y de la Hispanic Society of America.

MARQUARDT (Eduardo H.), profesor titular de Derecho Penal en la Universidad Católica de Buenos Aires, profesor adjunto a cargo de cátedra de la Universidad Nacional de Buenos Aires, procurador fiscal de la Corte Suprema de Justicia.

MARTÍNEZ GARAYGORDÓBIL (Xavier), licenciado en Ciencias Químicas.

MASSÉ (Henri), miembro del Instituto de Francia, administrador de la Escuela Nacional de Lenguas Orientales de París.

MAURY (Lucien), director de la Casa de Suecia en la Ciudad Universitaria de París.

MAYA (Rafael), miembro de la Academia Colombiana de la Lengua, correspondiente de la Real Academia Española, profesor de Literatura de la Universidad de los Andes.

MENEGAUX (A.), catedrático de Ciencias Naturales, doctor en Ciencias.

MESLIN (Michel), catedrático de Historia, profesor en el Instituto de Amiens.

MÉTADIER (Albert), ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

MICHEL (Édouard), crítico de arte.

MIRAMBEL (André), catedrático de Universidad, profesor en la Escuela Nacional de Lenguas Orientales de París.

MONTERDE (Francisco), doctor en Letras, catedrático de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad Nacional Autónoma de México.

MORGENSTERN (Laura), del museo Guimet, de París.

MOSCOTE (Rafael E.), miembro de número de la Academia Panameña de la Historia, jefe del Departamento de Historia de la Facultad de Filosofía, Letras y Educación de la Universidad de Panamá.

NUÑEZ MOLINA (Luis N.), director general de Educación Rural de la República Dominicana.

ODERIGO (Mario A.), ex juez de la Cámara Nacional en lo Criminal y Correccional de la Capital Federal, profesor titular de Derecho Procesal de la Universidad Nacional de Buenos Aires.

PALACIOS (Julio), catedrático de la Universidad de Madrid, miembro de la Real Academia Española, de la Real Academia de Ciencas Exactas, Físicas y Naturales, y de la Real Academia de Medicina, presidente del Comité Español de la Union Internacional de Física Pura y Aplicada, correspondiente de la Academia de Ciencias de Buenos Aires.

PANICO (Robert), doctor en Ciencias Físicas.

PARDO DE LEYGONIER (G. F.).

PENA (Mariano H.), profesor adjunto de la Universidad Nacional de Buenos Aires, juez de la Cámara Nacional en lo Criminal y Correccional de la Capital Federal, miembro titular de la Sociedad Argentina de Criminología, miembro fundador de la sección argentina de la Asociación Internacional de Derecho Penal, miembro del Consejo Nacional del Menor, profesor titular de la Universidad Católica de Buenos Aires.

PEREIRA RODRÍGUEZ (José), vicepresidente de la Academia Nacional de Letras del Uruguay, secretario del Instituto Histórico y Geográfico, miembro correspondiente de la Real Academia Española y de la Real Academia de la Historia de Madrid.

PHAM VAN KY, escritor y crítico literario.

PITROU (Robert), profesor en la Facultad de Letras de Burdeos.

POLANSCAK (Antun), profesor en la Facultad de Filosofía de la Universidad de Zagreb.

PORTIER (Paul), miembro del Instituto de Francia.

QUIÑONES (Fernando), colaborador en publicaciones españolas, colombianas y argentinas, premio « Sésamo » y « La Nación » de Buenos Aires.

RAY (Jean), catedrático de Filosofía, doctor en Derecho, asesor jurídico de la Embajada del Japón en París.

RÉAU (Louis), miembro del Instituto de Francia, profesor honorario de la Sorbona.

REPARAZ (Gonzalo de), doctor en Letras por la Universidad de Toulouse.

RIGAUDY (Jean).

RODRÍGUEZ CRESPO (Pedro), catedrático de Historia de la Facultad de Filosofía y Letras de la Pontificia Universidad Católica de Lima.

RODRÍGUEZ GALLEGO (José María), licenciado en Derecho.

ROLANDI (Ugo), doctor en Letras, profesor en el liceo de Venecia.

ROUBAULT (M.), director de la Escuela Nacional Superior de Geología de París.

RUIZ MORENO (Isidoro), profesor titular de Derecho Internacional Público en la Universidad Nacional de Buenos Aires, miembro de la Academia Nacional de Derecho.

SALVERDA DE GRAVE (J.-J.).

SAN JUAN (Ricardo), catedrático de la Universidad de Madrid, miembro de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid.

SARAIVA (Antonio José), doctor en Letras por la Universidad de Lisboa, ex profesor adjunto de la Facultad de Letras de Lisboa.

SILVA CASTRO (Raúl), miembro de la Academia Chilena de la Lengua, correspondiente de la Real Academia Española, profesor de la Universidad de California.

SMERDOU (Luis María), licenciado en Derecho, diplomado del Instituto Europeo de Administración de Empresas.

SOLER (Sebastián), profesor titular de Derecho Penal en la Universidad Nacional de Buenos Aires, presidente de la sección argentina de la Asociación Internacional de Derecho Penal, miembro del Consejo Superior del Comité Internacional de Juristas, ex procurador general de la Nación.

SOMOZA (Javier Enrique), jefe del Instituto Geográfico Militar de Buenos Aires, secretario de la Sociedad Argentina de Estudios Geográficos, profesor de Geografía de la Universidad Católica El Salvador.

SUBIRÁ (José), académico bibliotecario de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, jefe de la Sección de Madrid del Instituto Español de Musicología, miembro correspondiente de la Hispanic Society of America.

TAMAYO (Jorge L.), ingeniero civil, profesor en la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad Nacional de México, secretario de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística.

TEMPLADO (Félix), licenciado en Ciencias Exactas por la Universidad de Madrid.

TERÁN (Francisco), profesor de Geografía en la Universidad Central del Ecuador, miembro de la Sociedad de Estudios Geográficos del Ecuador y de la Sociedad de Estudios Geográficos de la Argentina.

TIBAL (André), ex profesor de la Universidad de Praga.

TOMBECK (Daniel), doctor en Ciencias Físicas, ex secretario honorario de la Facultad de Ciencias de la Universidad de París.

TORO (Miguel de), doctor en Letras, miembro correspondiente de la Academia Española.

TORREALBA LOSSI (Mario), profesor de Literatura Venezolana e Hispanoamericana en el Instituto Pedagógico de Caracas.

TOUREN (Alain), antiguo alumno de la Escuela Normal Superior de París, catedrático en el liceo de Mequínez.

TOUREN (Raymond), antiguo alumno de la Escuela Normal Superior de París, catedrático de Ciencias Físicas, profesor en el liceo Saint-Louis, de París.

VAL (Juan Antonio del), licenciado en Letras.

VANDIER (Nicole).

VARILLAS MONTENEGRO (Alberto), profesor de Historia Literaria en la Pontificia Universidad Católica de Lima.

VASCONSELLOS (Víctor N.), profesor de Historia del Paraguay en el Colegio Nacional de Asunción, miembro del Consejo de Enseñanza Secundaria, Normal y Comercial.

VILA (Pablo), ex profesor de la Escuela Normal de la Generalidad de Cataluña, ex profesor de la Escuela Normal Superior de Bogotá, ex jefe y profesor del Departamento de Geografía e Historia del Instituto Pedagógico de Caracas.

VILLACORTA C. (J. Antonio), socio fundador de la Sociedad de Geografía e Historia de Guatemala, Palmas Académicas (en oro) del Gobierno Francés.

VILLAT (Louis).

WARNIER (Raymond), director del Instituto Francés de Colonia.

WIET (Gaston), profesor del Colegio de Francia.

ZORRAQUÍN BECÚ (Ricardo), presidente de la Academia Nacional de Historia de la Argentina, profesor titular de Introducción al Derecho en la Universidad Nacional de Buenos Aires.

Han colaborado en esta obra

redacción
Fernando GARCÍA-PELAYO y GROSS, Jean-Paul VIDAL.

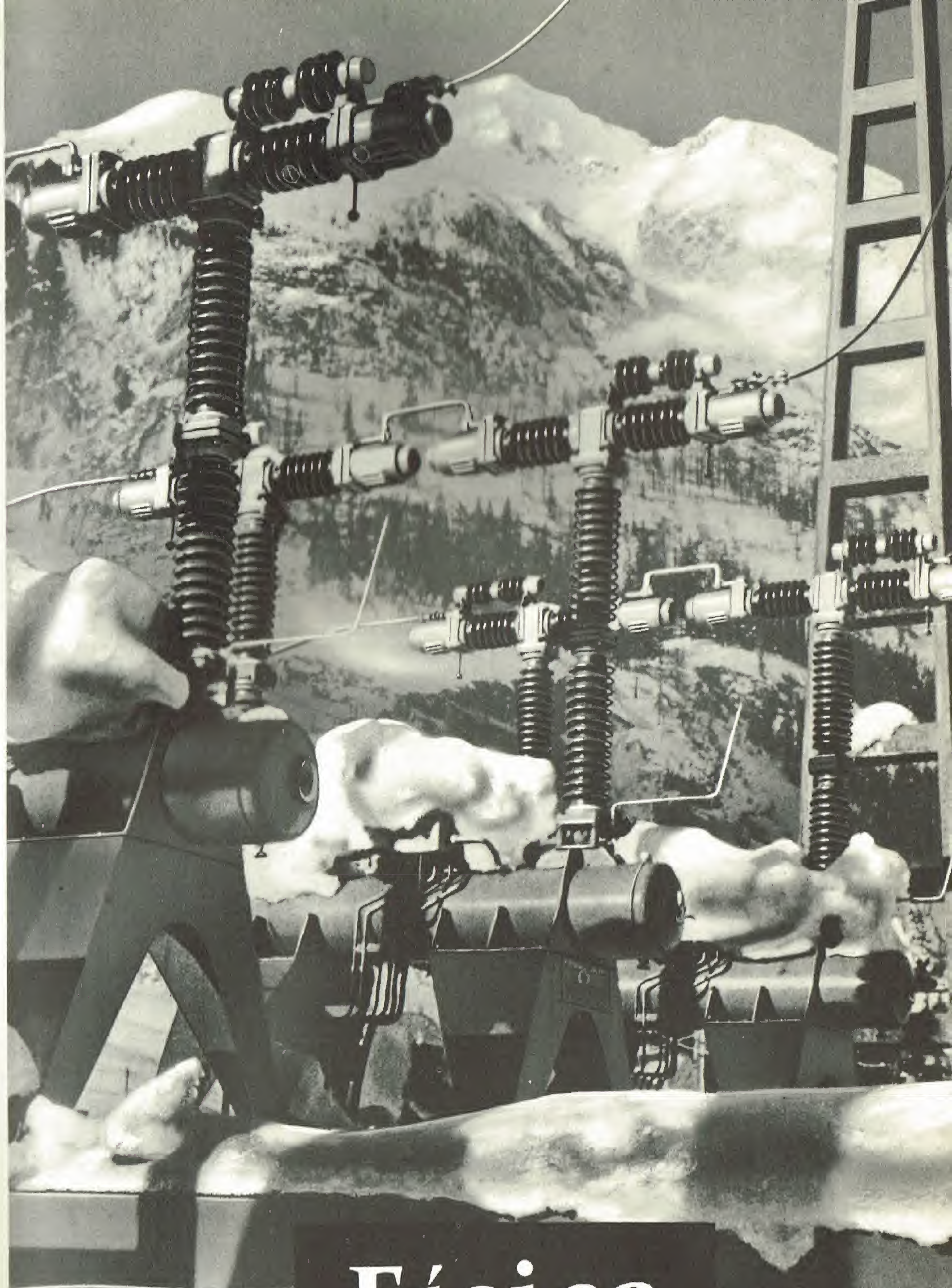
corrección-revisión
Adolphe V. THOMAS, jefe del servicio de corrección.
Amadeo BERNADÓ CALCATÓ, Antonio GARCÍA BIRLÁN, Fernando GÓMEZ PELÁEZ.

cartografía
Jean BARBIER, jefe del servicio de cartografía.

fotografía
André LAPORTE, jefe del servicio de fotografía.
Mariano AGUAYO, Faustino PASTOR.

dibujo
Maurice TAMAGNO, jefe del servicio de dibujo.

maqueta elaborada por Juan COUSIÑO, Henri de MONTROND y Simone PIERRE



Física

Introducción

Según Kant, "el estudio científico de la naturaleza y su estudio matemático son una misma cosa". Es tentador aceptar el criterio del filósofo alemán y definir la Física como la Matemática de la Naturaleza. Pero la Física no puede monopolizar la Matemática aplicada, pues a nadie se le ocurrirá pensar que el cálculo de probabilidades aplicado a cuestiones de genética cae dentro de la Física.

Desde luego, las teorías físicas son teorías matemáticas, pero hay una diferencia fundamental entre la Matemática pura y la que se utiliza en Física. Los matemáticos pueden partir de definiciones y postulados o axiomas elegidos a su sabor, con el único requisito de que no impliquen contradicción, y con auxilio de su lógica, esto es, con lo que Poincaré llamó inducción matemática, pueden remontarse de lo particular a lo general. No así en Física; sus leyes universales, aunque tengan aspecto matemático y aunque se enuncien como postulados, son experimentales porque han de ser confirmadas en todas sus consecuencias. Este carácter empírico las coloca en situación precaria, porque siempre están en peligro de necesitar retoques o aditamentos como consecuencia de un mayor refinamiento en los métodos de observación. Por eso puede decirse que la Física pretende crear estructuras matemáticas con las que se explique los fenómenos naturales conocidos y que resulten confirmadas en todas sus consecuencias.

Para formar sus teorías utiliza la Física, en primer término, los entes de la Geometría: distancias, áreas, volúmenes, ángulos planos y ángulos sólidos, los cuales resultan de la contemplación de los cuerpos que nos rodean, mediante un proceso de abstracción que consiste en prescindir de las diferencias materiales para atender a los rasgos comunes. Además, se sirve la Física de otros conceptos, o creaciones mentales, que no son percibidos directamente por nuestros sentidos, pero que son útiles para la explicación de los fenómenos que observamos. Algunos, como el tiempo, la velocidad, la fuerza, la temperatura, son anteriores a la ciencia física y proceden de la necesidad, común a todos los hombres, de atribuir una causa a todo lo que ocurre, por lo que, a pesar de su carácter puramente mental, se manifiestan por efectos observables y, en este sentido, podemos decir que pertenecen a la realidad. Otros, como la masa, la energía en sus múltiples acepciones, el potencial, la entalpia y la entropía, han sido forjados con el sólo fin de construir las teorías físicas a la manera matemática.

Todo ente físico tiene la propiedad de manifestarse por un efecto observable cuya descripción sirve para su *definición cualitativa*, esto es, para saber de qué se trata. Además, para que pueda figurar en una estructura matemática, es preciso que puedan medirse las cuantías o cantidades con que interviene en cada caso particular, lo que obliga a dar su *definición cuantitativa*, esto es, a establecer el criterio de igualdad entre cantidades y a definir lo que ha de entenderse por producto de una cantidad por un número. Esto último requiere que se haga la descripción de las operaciones que permiten averiguar, sin ambigüedad, cuántas veces una cantidad está contenida en otra. Cuando se han establecido estos criterios, adquiere el ente de que se trata el rango de magnitud física, y ya es apto para intervenir en las estructuras matemáticas.

Las definiciones, tanto cualitativas como cuantitativas, deben preceder al enunciado de las leyes, pues de otro modo nada significarían y no sería posible comprobar si son ciertas o falsas. Por no haber dado la definición cualitativa de cada una de las magnitudes del campo electromagnético se ha embrollado de tal modo su teoría que es difícil encontrar libros en que se distingan claramente unas de otras y abundan aquellos en que se confunden y trastruecan.

En los libros españoles se distingue claramente entre magnitud y cantidad, pero en los libros extranjeros no se encuentra sino el vocablo equivalente a cantidad, por lo que sería preciso emplear una locución o una palabra compuesta para designar las magnitudes (quantities of the same kind, Grössenart, espèce de grandeurs), y como no se hace así, resultan confusiones sin cuento. Así, cabe hacer un Álgebra abstracta de las magnitudes como la elaborada por Ricardo San Juan, pero en contra del criterio que trata de imponer la Unión Internacional de Física Pura y Aplicada, las estructuras matemáticas de la Física no pueden ser consideradas como un Álgebra de cantidades.

Es un hecho que cualquiera puede comprobar que las leyes en que se basan todas las teorías físicas pueden enunciarse como relaciones de proporcionalidad entre las cantidades que intervienen en el fenómeno considerado. Así, la ley de Coulomb se enuncia diciendo que la fuerza entre dos cargas eléctricas es proporcional a la cantidad de cada una y está en razón inversa del cuadrado de la distancia que las separa. Simbólicamente:

$$(f) \propto (Q_1)\ (Q_2)\ /\ (r)^2 \qquad \text{entre cantidades,}$$

donde el paréntesis indica que se trata de cantidades. Si se ha definido previamente lo que significa multiplicar por un número, n, cada una de las cantidades que figuran en esta expresión, su sentido es perfectamente claro, pues quiere decir que si se multiplican por n ambas cargas, se hace n^2 veces mayor la fuerza, mientras que si se multiplica por n la distancia, la fuerza se hace n^2 veces menor. Esto basta para poder comprobar la exactitud de la ley.

Las relaciones de proporcionalidad entre cantidades tienen carácter universal porque para establecerlas no hace falta introducir elemento arbitrario alguno o que sea resultado de un convenio. Por eso no fueron afectadas por la adopción del sistema métrico decimal.

En las teorías físicas no se manejan relaciones de proporcionalidad, sino ecuaciones, lo que requiere la adopción de unidades para obtener los números que sirven de medida para las cantidades. Al pasar de las relaciones de proporcionalidad entre cantidades a las ecuaciones entre medidas, si se quiere que sean válidas con unidades cualesquiera, hay que poner un factor de proporcionalidad. Así, la ley de Coulomb se representa por la ecuación:

$$f = CQ_1Q_2/r^2 \qquad \text{entre medidas,}$$

donde C depende de las unidades con que se midan las fuerzas, las cargas eléctricas y las distancias.

También las ecuaciones entre medidas tienen un sentido perfectamente claro, pues expresan que el número que figura a la izquierda del signo de igualdad *es igual* al que resulta efectuando con los números del segundo miembro las operaciones que se indican.

Además de las relaciones de proporcionalidad entre cantidades y de las ecuaciones que sirven de expresión a las leyes físicas, se encuentran en Física las ecuaciones con que se definen las *magnitudes secundarias*, esto es, aquellas magnitudes que se introducen con el sólo fin de abreviar el lenguaje y la escritura. Expresiones tales como:

$$v \equiv ds/dt; \qquad E \equiv f/Q; \qquad C \equiv Q/\Delta\ V,$$

que sirven para definir la velocidad, la intensidad del campo eléctrico y la capacidad eléctrica, son definiciones y no leyes. Mejor que como ecuaciones han de considerarse como identidades, pues ambos miembros son una misma cosa, y pueden siempre reemplazarse mutuamente, a diferencia de las ecuaciones propiamente tales, que sólo son válidas en el fenómeno a que se refieren.

La presencia del factor de proporcionalidad hace que las ecuaciones de la Física, lo mismo que las de la Geometría, presenten una peculiaridad notabilísima. Las ecuaciones A B y A CB son incompatibles con arreglo a las normas de la Matemática pura. En cambio, son perfectamente compatibles en Física y en Geometría, pues todo depende de las unidades con que se midan A y B. Así, el área del círculo puede ser representada por:

$$A = r^2; \qquad A = \pi r^2; \qquad A = Cr^2,$$

siendo C un número cualquiera, con tal de elegir convenientemente las unidades de longitud y de área.

Otra peculiaridad que comparten las ecuaciones de la Física con las de la Geometría consiste en que cumplen el requisito de ser homogéneas desde el punto de vista dimensional. Esto quiere decir que se puede atribuir a cada magnitud física una fórmula dimensional, aplicar a estas fórmulas las reglas formales del Álgebra y comprobar que todos los términos de cualquier ecuación física tienen la misma fórmula dimensional. Esta propiedad, que fue ya señalada por Fourier, constituye el fundamento del Análisis Dimensional, que tiene gran importancia y ha sido y es objeto de innumerables monografías en las que se trata de buscar sus fundamentos y justificar sus aplicaciones, cosa que no se ha conseguido hasta muy recientemente. Vamos a indicar brevemente cómo se ha logrado este propósito.

La señora Ehrenfest-Affanassjewa hizo notar que las ecuaciones de la Física obligaban a generalizar la definición de funciones homogéneas, y siguiendo este orden de ideas demostró Ricardo San Juan que las funciones homogéneas generalizadas son las únicas aptas para definir una magnitud de manera que la igualdad y la suma de sus cantidades sea independiente del sistema de unidades.

La aportación de la Matemática pura se limita a fijar las condiciones que han de reunir las definiciones de las magnitudes que hemos llamado secundarias, pero no roza el problema fundamental del Análisis Dimensional, que consiste en fijar el número de magnitudes necesarias y suficientes para formar una base dimensional y, por consiguiente, para establecer los sistemas de unidades coherentes con un sistema dado de ecuaciones. Esta importantísima cuestión, de capital importancia para la obtención de teorías bien constituidas, no había logrado solución satisfactoria porque, a nuestro juicio, ni siquiera había sido debidamente planteada, pues no se había tomado en consideración el papel que desempeñan las constantes universales.

El factor de proporcionalidad que aparece al pasar de las relaciones entre cantidades a las ecuaciones entre medidas tienen todos los caracteres que se atribuyen en Física a las constantes universales, pues su valor depende tan sólo de las unidades que se adopten arbitrariamente para medir las cantidades que concurren con él en una misma ecuación. Recíprocamente, cabe adoptar para dicho factor un valor numérico cualquiera, tal como $C = 1$ ó $C = 4\pi$, con lo cual queda restringida la libertad en la elección de unidades, pues una de ellas queda determinada en función de las demás. De aquí resulta que, para fijar sin ambigüedad el número de magnitudes básicas o, lo que viene a ser lo mismo, el número de unidades que pueden elegirse arbitrariamente, hay que establecer un postulado que permite decidir cuándo una constante universal es imprescindible y debe conservarse en la ecuación, y cuándo puede ser sustituida por un número fijo sin detrimento de la utilidad del Análisis Dimensional.

No cabe en esta Introducción el Análisis del problema así planteado, por lo que remitimos al lector a nuestro libro de Análisis Dimensional, donde verá cómo ha sido resuelto y cómo ha sido comprobada la solución en todos los capítulos de la Física.

Con las precedentes consideraciones he pretendido poner de manifiesto que, al elaborar la estructura matemática aplicable a una teoría física, hay que atenerse a ciertas normas. Procede ahora indagar si las teorías actuales están conformes con ellas. La respuesta es que, hasta la aparición de la teoría de la relatividad, había conformidad con una sola excepción: la teoría del campo electromagnético. En esta teoría se parte de las ecuaciones de Maxwell, pero todos los autores las uti-

lizan escritas a la manera de Gauss, con lo que violan la norma de no omitir las constantes indispensables que, en este caso, son la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética del vacío. En su lugar, se introduce una sola constante, c, que resulta ser, a la vez, la relación entre dos cargas eléctricas (la mitad electrostática y la unidad electromagnética) y la velocidad de la luz en el vacío. Esta duplicidad es inadmisible desde el punto de vista dimensional, pues debiera carecer de dimensión por ser la razón entre dos cargas eléctricas y, a la vez, ser homogénea con la velocidad.

A fines del pasado siglo aplicó Lorentz las ecuaciones de Maxwell al estudio del movimiento de los corpúsculos en un campo electromagnético. Sus estudios han servido de base a lo que ahora constituye una de las más importantes ramas de la Técnica, la Electrónica, por lo que Lorentz debe ser considerado como su fundador. Entre las consecuencias deducidas por Lorentz de las ecuaciones de Maxwell, quizá la más trascendental es que todos los sólidos, cualquiera que sea su rigidez, cambian de tamaño y de forma por efecto del movimiento. Por vez primera se descubría un fenómeno que permite dar carácter absoluto al movimiento, pues se manifiesta por el cambio en una de las propiedades intrínsecas del cuerpo afectado. La longitud de una barra depende de la velocidad y del ángulo que forma con la dirección en que se mueve, y es máxima, e independiente de su orientación, cuando está en reposo. El reposo absoluto puede, pues, definirse como aquel estado en que los cuerpos sólidos tienen el tamaño máximo.

Otra consecuencia de las ecuaciones de Maxwell, cuando se escriben a la manera de Gauss, que es como las utilizó Maxwell, consiste en que la constante c, por ser la relación entre dos cargas, tiene que conservar su valor cuando ambas se mueven del mismo modo, pues lo que ocurra a una habrá de suceder a la otra. Por otra parte, como dicha constante tiene que ser también igual a la velocidad con que se propagan las ondas electromagnéticas en el vacío, resulta que dicha velocidad ha de ser independiente de como se mueve el observador que la mide. Lorentz demostró que, para cumplir este requisito, había que introducir un tiempo ficticio que él llamó *tiempo local*. Con su auxilio dedujo unas fórmulas que llevan su nombre y sirven para pasar de ejes fijos a ejes móviles, dan cuenta de la contracción de los sólidos y dejan invariable la velocidad de la luz.

Los célebres experimentos de Michelson y Morley comprobaron las predicciones de Lorentz en lo que a la contracción de los sólidos se refiere, pero en rigor, nada puede deducirse de ellos acerca de la realidad del tiempo local, por la sencilla razón de que no hubo necesidad de emplear relojes de ningún género. Nada tampoco podía deducirse acerca de la pretendida invariabilidad de la velocidad de la luz, ya que no se utilizaron ni metros ni relojes, cosa indispensable siempre que se trata de medir velocidades. Sin embargo, los referidos experimentos fueron interpretados como si el tiempo local tuviese realidad física, esto es, como si todos los relojes hubiesen de comportarse automáticamente de acuerdo con las ecuaciones de Lorentz y como si la velocidad de la luz fuese la misma en todos los sistemas inerciales. Éste fue el comienzo de la teoría de la relatividad de Einstein, que recibió luego el nombre de especial o restringida para distinguirla de la teoría general fundada también por Einstein.

Es de notar que, si en las ecuaciones de Maxwell no se hubieran suprimido las constantes características del vacío, no se hubiera deducido de ellas la constancia de la velocidad de la luz. Podemos, pues, decir que la teoría de la relatividad nació como cosecuencia del escamoteo de dichas constantes.

Tampoco la teoría general de la relatividad se ajusta a las normas del Análisis Dimensional, pues empieza por afirmar que la masa gravitatoria y la masa inercial son una misma cosa, lo que equivale a suprimir la constante de la gravitación en la ley

$$m_g = \sqrt{m_i}$$

descubierta por Newton y confirmada por sus experimentos con péndulos de distintos materiales y por el hecho de que todos los cuerpos caen con igual velocidad en el vacío.

Si al violar las normas dimensionales se hubiese conseguido un avance indiscutible, habría que felicitarse de dicha violación y repudiar por estrechas dichas normas. Pero es el caso que, al cabo de más de medio siglo, la teoría de la relatividad es objeto de enconadas discusiones y cabe la duda de si en vez de contribuir al avance de la Física teórica es una rémora que dificulta su progreso.

Julio PALACIOS

Definición y clasificación

Definición de las ciencias físicas. — Las ciencias físicas estudian las propiedades generales de la materia, propiedades primeramente reveladas por los órganos de los sentidos, que nos permiten percibir las diferentes sensaciones: el ojo nos permite conocer la forma y el color de los objetos; el oído nos transmite los sonidos; mediante el tacto percibimos la presión (o la pesadez) y la temperatura. La función de los sentidos del gusto y del olfato en la educación del hombre ha sido mucho menos importante.

Las propiedades de la materia se deben a su constitución, y si ésta se conociera con todo detalle, las ciencias físicas sólo serían, evidentemente, un capítulo de la mecánica sobre las propiedades de ciertos sistemas bien definidos.

Distinción entre la física y la química. — Entre los fenómenos que presenta la materia no organizada se han distinguido dos órdenes: los que sólo modifican pasajeramente las propiedades y el aspecto de los cuerpos, y los que las modifican con carácter permanente. Los primeros apenas dependen de la naturaleza de los cuerpos, mientras que los segundos dependen estrechamente de la misma y son debidos casi siempre a la acción recíproca de los cuerpos, que desaparecen en estas reacciones para originar otras materias dotadas de nuevas propiedades. Estas dos ramas de las ciencias físicas son: la física propiamente dicha y la química.

El límite entre estas dos ciencias es en la actualidad cada vez menos acusado, dada la estrecha relación existente entre ambas, que tienden a fundirse en una ciencia única: una mecánica molecular, ya que la atomística moderna reduce el estudio de las propiedades de la materia al de las fuerzas y movimientos.

Los métodos de la física. Observación y experimentación. — La física, que estudia ciertas propiedades de la materia, es en principio una ciencia de observación. Observar atentamente un fenómeno es, en primer lugar, apreciar con exactitud todas las circunstancias que lo acompañan, pero es también saber discernir lo que en dichas circunstancias es esencial de lo que sólo es accesorio, o incluso de lo que no tiene relación alguna con el hecho observado: esto requiere una numerosa serie de observaciones, en las que los diversos factores de los fenómenos intervendrán en formas diferentes que permitan dicha apreciación. Sucede con frecuencia que las observaciones así obtenidas no permiten distinguir claramente lo importante de lo accesorio; el físico recurre entonces a la experimentación.

La experimentación consiste en efectuar una observación de forma que simplifique lo más posible las condiciones del fenómeno: por ejemplo, no variando más que una de las circunstancias mientras que las restantes permanecen idénticas, a fin de obtener del conjunto de múltiples influencias la que pertenece exclusivamente al fenómeno considerado.

Hipótesis y teoría. — Aunque nuestros sentidos constituyen nuestros primeros medios de información, ellos solos son insuficientes para revelarnos lo que existe; tendremos que interpretar lo que observamos mediante el razonamiento y reconocer la existencia de la materia que no vemos (el gas, por ejemplo) por sus efectos. Por consiguiente, al lado de los hechos observados, que son siempre reales, caben interpretaciones diversas, dependientes del progreso de la ciencia.

La ciencia procura agrupar los hechos que puedan depender de una misma causa; esta causa, una vez conocida, permitirá la deducción de dichos hechos.

En muchos casos la causa es desconocida y es reemplazada por una hipótesis. El explicar varios hechos por la misma hipótesis, o toda una serie de hechos por algunas hipótesis, permite transformar en teoría hechos que no guardan, al parecer, ninguna dependencia entre sí: entonces, mediante el razonamiento y el cálculo, se encuentran nuevos hechos del mismo orden, que al verificar la teoría *a posteriori* justifican su empleo y legitiman las hipótesis que les sirven de fundamento.

Desde el momento en que una teoría explique lo observado, debe considerarse como prácticamente verdadera. Todo nuevo hecho que no pueda explicarse por medio de la teoría obligará a reemplazarla o a modificar las hipótesis que le sirven de base. La perfección de una teoría estriba en que permita explicar el mayor número posible de hechos con el menor número de hipótesis.

Unidades que se emplean en la física. — Actualmente se tiende a adoptar el llamado sistema internacional —S. I.—, en el que las unidades de base son: unidad de longitud (metro); unidad de masa (kilogramo); unidad de tiempo (segundo); unidad de intensidad de corriente eléctrica (amperio); unidad de temperatura (grado Kelvin); unidad de intensidad luminosa (candela).

(V. ARITMÉTICA y ÁLGEBRA, pág. 34 y sig. Vol. V, y MECÁNICA RACIONAL, pág. 246, vol. V.)

Clasificación. — La física se divide en cierto número de partes, que corresponden a las propiedades generales que se estudian:

La *gravedad*, que estudia la atracción que ejerce la tierra sobre todos los cuerpos; *la estática de los gases y de los líquidos; el calor; la acústica; la óptica; la electricidad* y el *magnetismo*.

Estas divisiones estaban justificadas en otra época, en que se creía que cada categoría de fenómenos era engendrada por un fluido especial, calórico, luminoso, eléctrico, pero en la actualidad sólo se conservan por comodidad de exposición, ya que la multitud de relaciones insospechadas que se han descubierto entre los fenómenos luminosos, eléctricos y magnéticos permiten considerar sus diversas manifestaciones como diferentes aspectos de una misma energía. Las adoptaremos, pues, con este espíritu.

Estado físico de los cuerpos

Estado físico. Cambios de estado. Estructura molecular. Medios isótropos. Medios anisótropos. Medios cristalinos. Medios amorfos. Cristalización. Constitución física de los cristales. Isomorfismo. Estado coloidal

Estado físico. — Los cuerpos suelen distinguirse por su estado físico: estado sólido, estado líquido o estado gaseoso.

Un cuerpo *sólido* tiene *forma* y *volumen propios*, y se representa por un cuerpo rígido que sólo puede deformarse si se ejercen sobre él esfuerzos más o menos intensos: un trozo de metal, por ejemplo.

Un *líquido* se caracteriza por tener un *volumen constante* y una *forma variable*, según el recipiente que lo contenga. Es fluido, y su volumen sólo varía si varía la temperatura.

Un *gas* se caracteriza porque su *forma* y *volumen* son *variables;* ocupa siempre el volumen del recipiente que lo contiene y no presenta nunca una superficie libre, como los líquidos. Es un fluido dilatable y compresible.

Cambios de estado. — Una misma substancia puede presentar los tres estados físicos diferentes, según sean la temperatura y la presión. El agua, líquida a la temperatura ordinaria, se transforma en gas, en vapor de agua, a 100° C y a la presión atmosférica *(por vaporización)*, y en sólido, hielo a 0° C, a la presión atmosférica (por *solidificación)*. Al elevarse la temperatura, el hielo vuelve a convertirse en líquido, por *fusión*. En la actualidad se clasifican los cuerpos, más racionalmente, con arreglo a su estructura íntima, ya que si bien todos los cuerpos pueden existir bajo uno de los tres estados antedichos, no siempre puede establecerse una diferenciación precisa entre ellos, y las propiedades pueden variar de una manera continua de un estado a otro. Por ejemplo, el vidrio, la cera, pueden convertirse en líquidos sin que se perciba una discontinuidad que permita una clara diferenciación (fusión pastosa); un metal, sometido a una presión de varios millares de atmósferas en un recipiente resistente, puede verterse por un orificio (fluencia).

Estructura molecular. — Considerados globalmente se puede decir que los cuerpos están constituidos por partículas idénticas y sumamente pequeñas *(moléculas)*, separadas por espacios vacíos. Dos cuerpos puros diferentes tienen diferentes moléculas. Las moléculas de un cuerpo puro pueden disponerse regularmente (estado cristalino) o en forma confusa e incoherente (estado amorfo).

Medios isótropos. Medios anisótropos. — Si se hace girar dos esferas dentro de bloques bien homogéneos, uno de **vidrio** y otro de **cuarzo** o de cristal de roca, se observará, al calentar ambas esferas, que la esfera de *vidrio* se transforma, al dilatarse, en otra *esfera:* el coeficiente de dilatación del vidrio es **el mismo en todas las direcciones.**

En cambio, la esfera de *cuarzo* se transforma, al dilatarse, en un *elipsoide;* ciertos radios de la esfera se han dilatado más que otros. El coeficiente de dilatación del cuarzo, por consiguiente, no es constante, sino que **varía según la dirección que se considere.**

Esta comprobación relativa al coeficiente de dilatación se reproduciría para las restantes magnitudes físicas: cohesión, índice de refracción, resistencia eléctrica, conductividad calorífica, etc.

Se dice entonces que el vidrio, cuyas propiedades son *independientes de la dirección* en que se consideren, es un medio **isótropo** (del griego *isos*, igual, y *trepein*, girar), mientras que el cuarzo, cuyas propiedades *varían según la dirección*, es un medio **anisótropo.**

Medios cristalinos. — Los medios **cristalinos** se caracterizan por su **anisotropía,** y los medios **amorfos** por su **isotropía.**

Más adelante se observará, al estudiar la difracción de los rayos X, que en los cristales las partículas materiales forman alineaciones **regulares,** *a lo que se atribuye la anisotropía.*

Si se consideran en el medio cristalino direcciones *paralelas*, con idénticas distribuciones de las partículas a lo largo de estas rectas, dichas rectas serán **equivalentes** desde el punto de vista de las propiedades físicas.

Medios amorfos. — Los medios amorfos presentan la misma estructura que los líquidos: sus moléculas están repartidas al azar, sin que existan direcciones privilegiadas; las propiedades son idénticas en todas las direcciones.

Los sólidos amorfos pueden asimilarse a líquidos inmovilizados cuya viscosidad sea lo suficientemente intensa para asegurar la rigidez.

Los sólidos amorfos, cuando pueden fundirse, sufren la denominada **fusión pastosa.** Se reblandean gradualmente, haciéndose cada vez más fluidos, lo que confirma la comparación anterior.

Los cuerpos cristalinos fundibles sufren la denominada **fusión neta.**

Cristalización. — La cristalización puede conseguirse por varios medios:

a) *Por fusión.* El cuerpo, una vez fundido, se deja enfriar; el líquido se solidifica generalmente en forma de cristales empotrados, que se desarrollan desde la periferia hacia el centro, protegido del enfriamiento y que se mantiene líquido durante más tiempo.

Puede suceder que el líquido se enfríe por debajo de la temperatura de fusión sin solidificarse: es el fenómeno denominado **sobrefusión,** que cesa si se introduce una pequeña porción de cristal sólido. El vidrio puede considerarse como un líquido sobrefundido;

b) *Por sublimación.* Los cuerpos con una fuerte tensión de vapor en estado sólido pueden sublimarse. Los vapores adquieren el estado sólido cristalizado al contacto con las paredes frías de un recipiente de condensación. El yodo, la naftalina, se subliman de esta forma;

c) *Por disolución.* Puede producirse la cristalización de un cuerpo en el seno de una solución por enfriamiento de la solución concentrada en caliente, o por evaporación del solvente.

La cristalización por disolución permite separar los cristales de una especie pura de los cuerpos que acompañan a la substancia y que pueden permanecer en solución (cristalización fraccionada).

Constitución física de los cristales. — La difracción de los rayos X ha permitido precisar la distribución de la materia en los medios cristalinos. La experiencia ha mostrado que a una misma malla pueden corresponder disposiciones diferentes; las partículas materiales se encuentran no solamente en los nodos, sino también en los centros de la malla, en los centros de las caras y en los puntos medios de las aristas.

Se ha reconocido también que, en los electrólitos, la disociación en iones se produce en el propio cristal: los iones, y no las moléculas, son los que ocupan las posiciones antes definidas.

Isomorfismo.—V. QUÍMICA, pág. 242 y GEOLOGÍA, vol. V.

Estado coloidal. — Se denominan *coloides* las substancias formadas por partículas muy pequeñas, llamadas **micelas** que, no obstante, constan de un número considerable de átomos. Las micelas pueden considerarse como moléculas muy pesadas y voluminosas, o también como aglomeraciones de moléculas.

Los coloides se encuentran, en particular, en los seres vivos: la albúmina, la gelatina (goma espesa), el almidón, etc., son substancias coloidales, como también lo son los jabones y ciertas substancias minerales (sílice, alúmina, etc.) que pueden presentarse bajo esta forma. Las micelas, en presencia de líquidos, dan soluciones carentes de limpidez denominadas **soles,** que bajo la influencia de ciertos factores, como el aumento de temperatura, la adición de alcohol, de electrólitos, etc., pueden *coagularse* o *flocularse*, transformación que une las micelas formando una red de mallas sueltas que aprisionan el líquido intermicelar. El sol se convierte en un **gel** (la gelatina de carne puede considerarse como un ejemplo).

Las membranas celulares de los seres vivos tienen una estructura micelar y se dejan atravesar por moléculas más o menos gruesas: la pared del intestino es permeable a la glucosa, mientras que la del riñón es, normalmente, impermeable. Con mayor razón son impermeables a las substancias coloidales, que no atraviesan las membranas de pergamino.

Los coloides cristalizan muy raramente, al contrario de otras substancias denominadas, por esta razón, *cristaloides.*

En los soles, las micelas se disocian en iones de diferentes magnitudes: uno de ellos, denominado **gránulo**, contiene casi la totalidad de los átomos: el otro es comparable a los iones minerales. El gránulo puede ser positivo o negativo, y cuando se le somete a la acción de un campo eléctrico se dirige al electrodo correspondiente.

A causa del tamaño de las micelas, el punto de congelación de las soluciones coloidales es próximo al del solvente puro.

Las micelas presentan una gran superficie libre y pueden fijar las materias colorantes por el fenómeno denominado *adsorción.*

El estado coloidal condiciona la existencia de los seres vivos.

Medida de las principales magnitudes
Longitudes - Masas - Tiempos

Principio de la medida de longitudes. Unidades. Tornillo micrométrico. Tuerca. Máquina de dividir. Microscopio micrométrico. Comparador. Catetómetro. Nonio. Pie de rey o calibre de corredera. Pálmer. Esferómetro. Medidas interferenciales. — **Medida de las masas:** Principio de la medida. Unidades. Noticia histórica de la balanza. Definición de la balanza. Diversos tipos de balanzas. Balanza de laboratorio. Teoría de la balanza. Método de simple pesada. Precisión de una balanza. Sensibilidad de una balanza. Fidelidad de una balanza. Cualidad esencial. Método de doble pesada. Caja de pesos. Dispositivos particulares de las balanzas de gran precisión. Balanza de Roberval. Balanza romana. Balanzas automáticas. Báscula de Quintenz. Corrección de las pesadas hechas en el aire. — **Medidas de pesos y de fuerzas:** Principio de la medida. Balanza de muelle. Dinamómetros de láminas de acero. Dinamómetros líquidos. — **Medida del tiempo:** Principio de la medida. Unidad. Reloj. Medida de intervalos bastante largos. Medida de intervalos cortos de tiempo

Principio de la medida de longitudes. — Medir una longitud es compararla con otra determinada que se ha tomado como unidad. Hay que definir, primeramente, lo que se entiende por longitudes "iguales" y por longitudes "múltiplas" o "submúltiplas" una de otra: se dice que dos longitudes son iguales cuando pueden superponerse exactamente, y que una longitud es "doble" de otra cuando equivale a la obtenida colocando una a continuación de otra dos longitudes iguales a esta última longitud. Análogamente se define la longitud múltipla o submúltipla de otra.

Unidades. — La unidad de longitud del sistema métrico es la longitud del metro patrón (v. ARITMÉTICA y ÁLGEBRA, p. 35, vol. V). Las unidades de los sistemas que se deducen del sistema métrico se definen como múltiplos o submúltiplos de esta longitud.

El metro patrón no se utiliza nunca prácticamente para las medidas, pero ha servido para la construcción de "patrones secundarios" fabricados de bronce, acero, cobre, etc., con la ayuda del comparador; estos últimos han servido a su vez para la fabricación de los metros que se encuentran en el comercio, metros que, valiéndose de la máquina de dividir, suelen subdividirse en decímetros, centímetros, milímetros, e incluso medios milímetros.

Una de las piezas esenciales de estos dos aparatos de medidas de alta precisión es el tornillo micrométrico.

Tornillo micrométrico. — Recordemos que se llama "hélice" a la curva que describe sobre un cilindro circular recto un móvil que se desplaza con movimiento uniforme paralelamente al eje del cilindro, mientras éste gira alrededor de dicho eje con un movimiento de rotación uniforme (*fig.* 1).

La distancia AB comprendida entre dos intersecciones sucesivas de la hélice con una generatriz del cilindro se denomina "paso de la hélice".

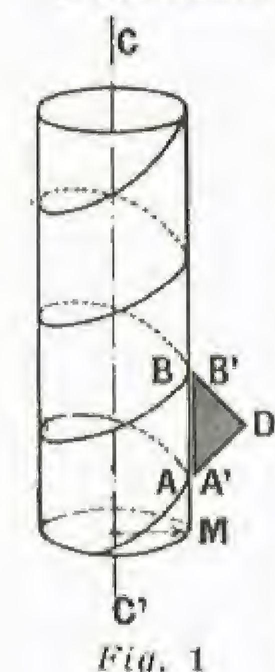


Fig. 1

Supongamos un polígono pequeño, por ejemplo un triángulo A'B'D, de base A'B' = AB, situado en el meridiano CC'M; supongamos, también, que este meridiano gira alrededor del eje CC' y que el punto A' describe la hélice; el triángulo A'B'D engendrará un sólido denominado "filete del tornillo" (el filete varía con la forma del polígono; en este caso sería triangular); el tornillo lo constituye el conjunto del sólido cilíndrico y del filete, siendo el "paso del tornillo" igual al "paso de la hélice".

Tuerca. — Se llama así la pieza determinada por la penetración del tornillo en un sólido; los entrantes de tuerca, que es una especie de molde, corresponden a los salientes del tornillo, y recíprocamente. Si se fija la tuerca y se hace girar el tornillo, éste avanza por cada vuelta completa, en la dirección del eje de la tuerca, una longitud igual a su paso.

Este modo de desplazamiento se utiliza en el esferómetro. Inversamente, si se hace girar el tornillo manteniendo fijos sus extremos entre los topes, la tuerca se desplaza en la dirección del eje; este dispositivo se utiliza en la máquina de dividir.

La propiedad esencial del tornillo es que "los desplazamientos paralelos al eje son proporcionales a los ángulos de rotación".

Si el paso del tornillo es pequeño, del orden de un milímetro, por ejemplo, se podrán obtener desplazamientos muy pequeños girando el tornillo una pequeña fracción de vuelta. Para evaluar estas fracciones de vuelta se adapta a la cabeza del tornillo un "limbo" o "tambor", consistente en un círculo con divisiones equidistantes. Estas divisiones van apareciendo ante un índice inmóvil que sirve de referencia.

Ambas piezas deben estar trabajadas con gran cuidado para eliminar cualquier juego que falsee las medidas. Existen sistemas de recuperación del juego, que compensan, hasta cierto punto, el desgaste del tornillo.

Máquina de dividir. — La máquina de dividir sirve para medir una longitud con precisión o para dividir una longitud, un metro, por ejemplo, en partes iguales; en este caso se le adjunta un dispositivo que permite grabar los trazos que corresponden a estas subdivisiones.

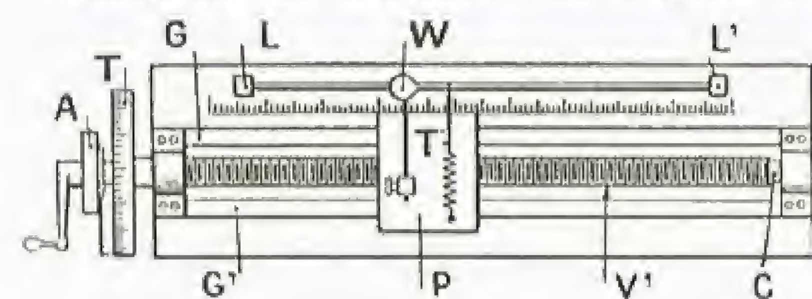


Fig. 2

Consta, esencialmente, de un tornillo micrométrico V' (*fig.* 2), cuya cabeza es solidaria de un tambor graduado, T, y cuyos extremos mantienen fijos un collar A y un gorrón; una tuerca adaptada a este tornillo lleva una placa P, denominada "carro", que se desliza sobre dos guías GG' paralelas al eje del tornillo.

Si el tambor contiene, por ejemplo, 1 000 divisiones, y el paso del tornillo es de un milímetro, el desplazamiento del carro correspondiente a una división es una milésima de milímetro.

El carro lleva un microscopio de poco aumento o "visor" W', y una punta trazadora T' que puede desplazarse perpendicularmente al eje del tornillo.

La longitud que hay que dividir o medir, LL', se coloca sobre un banco de hierro solidario del chasis, y debe ser perfectamente paralela al eje del tornillo, para lo cual se comprobará, desplazando el carro, que sus dos extremos coinciden con el punto de intersección de los hilos de una "retícula" que lleva el ocular del visor.

Se comienza por determinar con exactitud el paso del tornillo, utilizando una regla de longitud conocida, por ejemplo, un metro patrón: sea x el paso desconocido: si se hace girar el tambor p divisiones para poder enfocar, sucesivamente, las dos extremidades del metro, cada división del tambor corresponde a un desplazamiento de $1/p$ metro. Si el tambor contiene N divisiones (1 000, por ejemplo), el paso del tornillo valdrá N/p metro ($1\,000/p$). Conocido el paso del tornillo, la longitud de una regla colocada en lugar del metro patrón se determinará por una operación análoga.

Para dividir esta regla en un número dado, n, de subdivisiones, basta girar el tambor un número de divisiones n veces menor que el número de divisiones que corresponde a toda la longitud de la regla.

OBSERVACIÓN. Para las medidas de gran precisión hay que tener en cuenta la dilatación lineal del tornillo debida a la temperatura.

Microscopio micrométrico. — Los microscopios micrométricos (*fig.* 3) son microscopios de poco aumento, cuyos oculares son móviles con respecto al objetivo. Entre el objetivo y el ocular, en el plano en que se forma normalmente la imagen real proporcionada por el objetivo, se dispone un cuadro o chasis con dos hilos finos cruzados que constituyen lo que se denomina una "retícula".

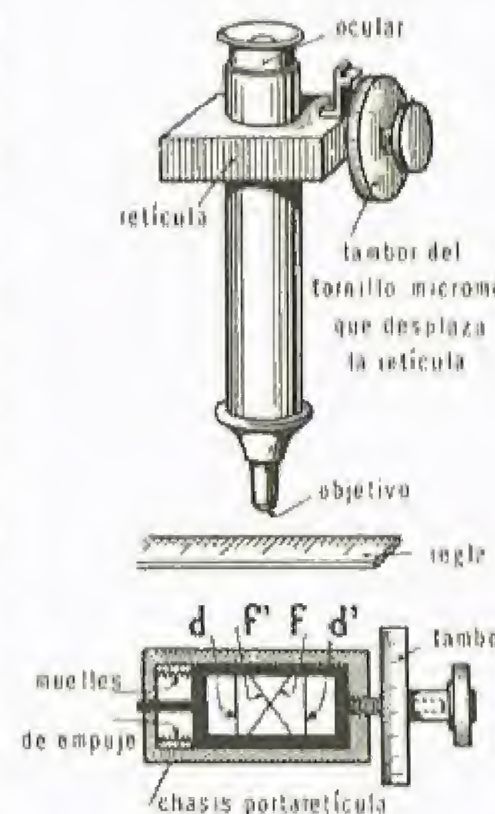


Fig. 3

Este cuadro puede desplazarse perpendicularmente al eje óptico del objetivo por medio de un tornillo micrométrico. La figura 3 representa el chasis: en ella pueden verse los hilos f, f' de la retícula, situados en la parte central de una ventana rectangular. El ocular, que se desliza con frotamiento suave, se sube o se baja hasta que la imagen de la retícula pueda verse con claridad, desplazando entonces, valiéndose del tornillo micrométrico, el punto de intersección de los hilos de la retícula hasta la mitad del campo; después se desplaza todo el microscopio para poner a punto las divisiones de la regla que hay que estudiar. Terminado este ajuste, se forma en el plano de la retícula la imagen real y aumentada de la regla dada por el objetivo; si d y d' son las imágenes de dos trazos consecutivos D, D', se cuenta el número de vueltas y de divisiones que hay que hacer girar el tambor del tornillo micrométrico que desplaza el chasis de la retícula para que el punto de intersección de los hilos pase desde su coincidencia con la división d a la coincidencia con la división d'.

Si se conoce la longitud de la división D, D' de la regla, se deduce de ella la longitud que corresponde a una división del tambor y, una vez hecha esta determinación, podrá utilizarse el dispositivo para medir con precisión una longitud DD' desconocida. Por medio de un microscopio micrométrico, cuyo tornillo tenga un paso de $1/2$ milímetro y cuyo tambor esté dividido en 500 partes, podrán medirse longitudes con una aproximación de $1/1\,000$ de milímetro.

Comparador. — El instrumento más perfecto para medir con gran aproximación las diferencias pequeñas que puedan existir entre reglas cuyas longitudes sean casi iguales es el *comparador*. Se le ha utilizado, por ejemplo, para comparar los patrones secundarios con el metro patrón y para estudiar la dilatación lineal de los sólidos en función de la temperatura.

El comparador consta, en esencia, de dos microscopios micrométricos fijados a un metro de distancia sobre soportes macizos rígidos; éstos están dispuestos de forma que el eje óptico o línea de enfoque de cada uno, constituido por la recta que une el centro óptico del objetivo con el punto de intersección de los hilos de la retícula, sea sensiblemente vertical.

Un carro sobre rieles permite situar bajo los microscopios el metro patrón, mantenido a 0° C en una cuba con hielo fundente, se acciona el tambor del tornillo micrométrico de cada ocular de forma que se haga coincidir el punto de intersección de los hilos de cada retícula con la imagen del trazo dibujado sobre el extremo correspondiente del metro patrón. Se reemplaza, entonces, este último por el patrón secundario o por el metro que hay que comparar, anotándose el número de vueltas completas y de divisiones que hay que hacer girar a cada tambor para que las retículas coincidan de nuevo con las imágenes de los trazos dibujados en las extremidades. Estas rotaciones corresponden en cada extremo a una longitud pequeña que se conoce desde el momento en que se han graduado los oculares micrométricos, y que se añadirán o se restarán de un metro, según el sentido de cada rotación.

Un método análogo permite estudiar la dilatación en función de la temperatura; basta con modificar y medir la temperatura de la cuba en la que se ha sumergido la regla que hay que estudiar.

Catetómetro. — Es un aparato imaginado por Dulong y Petit para medir con precisión la distancia entre dos puntos situados en una misma vertical o la distancia entre dos planos horizontales.

La medida consiste, en principio, en determinar con exactitud una línea de mira rigurosamente horizontal que pase por uno de los puntos, y después una segunda línea que pase por el otro. La distancia vertical entre ambas líneas de mira será la longitud buscada.

La línea de mira la determina el eje óptico de un anteojo que lleva una retícula. Esta retícula se ajusta mediante el ocular, y después, desplazando el sistema ocular-retícula, se hace que el plano de la retícula coincida con la imagen que da el objetivo del objeto que se contempla. Entonces se orienta el anteojo de forma que aparezca la imagen en el punto de intersección de los hilos de la retícula.

El catetómetro lleva un anteojo L, solidario de un carro C, que puede desplazarse a lo largo de una regla graduada deslizándose sobre un cilindro que envuelve una varilla rectilínea de acero montada sobre un pie provisto de tornillos de ajuste (*fig.* 4).

La varilla de acero sirve de eje de rotación del anteojo; la verticalidad de este eje de rotación se consigue mediante los tornillos de ajuste de su zócalo y niveles de burbuja N y N′. El eje óptico del anteojo se pone horizontal gracias al dispositivo de báscula BB′ y a un nivel que lleva el anteojo. Estos dos ajustes deben hacerse con el mayor cuidado, ya que la precisión de la medida depende de su perfección.

Fig. 4

Para efectuar la medida se enfocan, sucesivamente, los dos puntos cuya distancia quiere determinarse y se calcula el desplazamiento del carro C entre ambas líneas de mira mediante la regla graduada fija y un nonio solidario del carro.

Nonio. — El grado de aproximación que existe entre las graduaciones de una regla o de un tambor está limitado por la anchura de sus divisiones. El *nonio* permite, con una regla graduada en milímetros, por ejemplo, obtener medidas más precisas, es decir, diez veces más precisas: se dice entonces que el nonio es de 1/10; en este caso particular sólo discribiremos la teoría, de fácil generalización. Consideremos una regla graduada en milímetros y una reglilla móvil (nonio) que puede deslizarse a lo largo de la regla (*fig.* 5). La reglilla tiene una longitud de 9 mm, dividida, a su vez, en diez partes iguales, es decir, cada división d de la reglilla mide 9/10 mm; como cada división de la regla R mide un milímetro, es decir, 10/10 mm, al hacer coincidir el cero del nonio con el cero de la regla, el trazo 1 del nonio distará del trazo 1 de la regla $\frac{10}{10} - \frac{9}{10}$, o sea $\frac{1}{10}$ mm; el trazo 2 distará $\frac{2}{10}$ mm del trazo correspondiente de la regla, y así sucesivamente hasta llegar al trazo 10, que distará $\frac{10}{10}$ = 1 mm del trazo 10 de la regla, es decir, que coincidirá con su trazo 9.

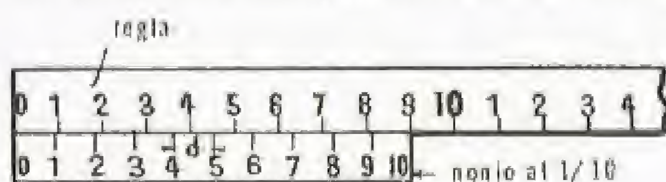


Fig. 5

Si se desliza la reglilla N/10 mm, cada uno de los trazos se desplazará la misma distancia $\frac{N}{10}$ mm, y el único trazo que coincidirá con un trazo de la regla será el trazo n.

Para medir una longitud G se hace coincidir uno de sus extremos E (no representado en la figura 6) con el cero de la regla y se lee la división N de la regla inmediatamente anterior al extremo E′; por ejemplo, N = 45 (*fig.* 6). La longitud que hay que determinar medirá, pues, N divisiones de la regla más la fracción NE′. Para obtener la longitud de esta fracción se desliza el nonio hasta que su cero coincida con E′, y se busca cuál de sus divisiones coincide con una división de la regla, si es que hay alguna que coincida; en el caso de la figura 7, coincide la séptima. Se ve fácilmente que NE′ = 7/10 de milímetro.



Fig. 6

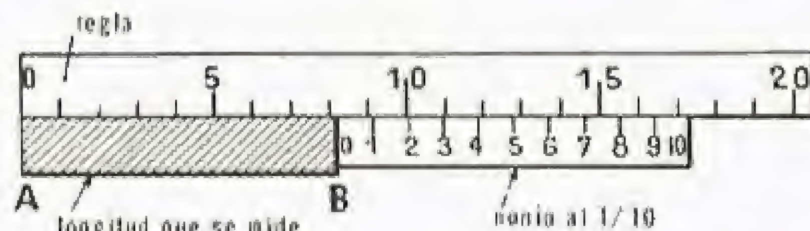


Fig. 7

Puede suceder, e incluso es el caso general, que no haya coincidencia entre un trazo de la regla y uno del nonio, en cuyo caso dos trazos del nonio se encontrarán comprendidos entre dos trazos sucesivos de la regla; por ejemplo, en la figura 7, los trazos 2 y 3 del nonio. Como se ve en la figura, la longitud que hay que medir, AB, es igual a 8 milímetros más una fracción mayor que 2/10 y menor que 3/10 de milímetro; tomando como valor de esta fracción la media aritmética de $\frac{2}{10}$ y $\frac{3}{10}$, es decir, $\frac{25}{100}$ mm, la longitud AB será entonces igual a 8,25 mm, con una aproximación de 1/10 de milímetro.

Pie de rey o calibre de corredera. — Es un aparato que sirve para medir con precisión el espesor de un objeto o el diámetro de una pieza cilíndrica, se compone de una regla, R, dividida en milímetros (*fig.* 8), en cuyo extremo lleva un tope, T, perpendicular. Una pieza móvil, T′, es solidaria de un carro que puede deslizarse a lo largo de la regla; este carro tiene una ventana con un nonio 1/10 inscrito en su borde; el carro puede fijarse sobre la regla dividida por medio de un tornillo a presión. Cuando los topes T y T′ están en contacto, el cero de la regla y el del nonio coinciden.

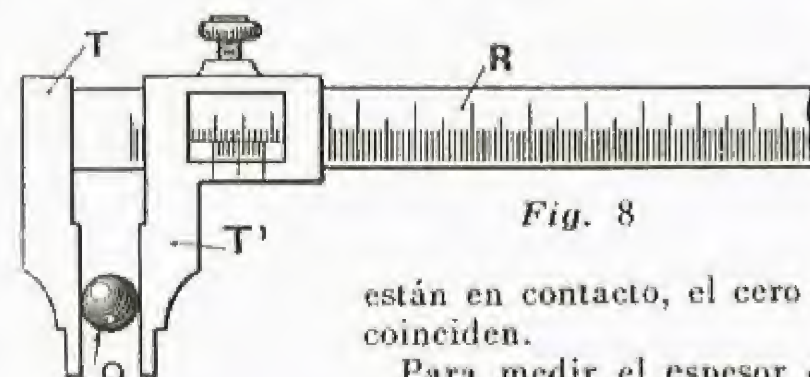


Fig. 8

Para medir el espesor de un objeto O, se le coloca entre los dos topes y se desplaza el carro hasta apretar ligeramente al objeto, fijando entonces el carro mediante el tornillo. Haciendo la lectura por medio del nonio se obtendrá el espesor buscado con una aproximación de 1/10 de milímetro.

Pálmer. — El *pálmer* es un aparato que sirve para medir con precisión espesores pequeños, como los diámetros de hilos finos. Está constituido (*fig.* 9) por una pieza, M, en forma de herradura, uno de cuyos extremos lleva una especie de yunque, E, sirviendo el otro de tuerca a un tornillo micrométrico cuyo paso es de un milímetro; el tambor, T, de este tornillo, está dividido en 100 partes. Cuando están en contacto los extremos del tornillo y el yunque, el tambor está en el cero; la posición de la división del tambor sobre la escala G, graduada en milímetros, indica el número de vueltas completas. El aparato permite evaluar la centésima de milímetro.

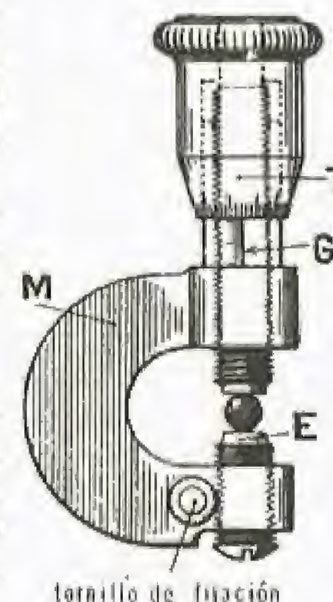


Fig. 9

Esferómetro. — Este aparato sirve para medir el radio de una esfera, o de la esfera a la que pertenece un casquete esférico. También puede servir para medir el espesor de una lámina de caras paralelas, o el diámetro de un hilo.

El *esferómetro* (*fig.* 10) se compone de un tornillo micrométrico cuyo paso es, por lo general, de medio milímetro; este tornillo, que acaba en una punta roma, P, se atornilla en una tuerca, E, que se apoya en un zócalo, S, por tres puntas de acero, A, B, C,; estas tres puntas forman los vértices de un triángulo equilátero cuyo plano es, por construcción, perpendicular al eje del tornillo y cuyo centro está situado sobre este eje. La cabeza del tornillo está constituida por un tambor T dividido en partes iguales (500). Sobre uno de los brazos del zócalo está fijada una regla R, dispuesta verticalmente y cada una de cuyas divisiones corresponde a una vuelta completa de tambor.

Para utilizar el instrumento se le coloca sobre un vidrio H perfectamente plano, girándose después el tambor hasta que la punta P se ponga en contacto con el plano de vidrio; en ese momento se anotan la división de la regla y la del tambor que se encuentra ante el borde biselado de la regla.

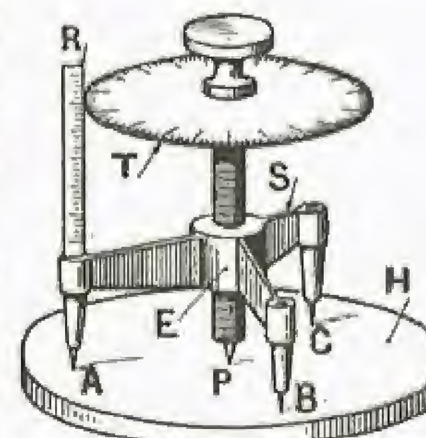


Fig. 10

Para medir el espesor de una lámina se levanta la punta P, se introduce la lámina y se gira el tambor hasta que dicha punta P se ponga en contacto con la lámina; la nueva lectura hecha sobre la regla y sobre el tambor permite determinar el espesor de la lámina.

Para medir el diámetro de un hilo se hace con él un nudo y se coloca bajo una lámina cuyo espesor se ha medido previamente; después se mide el espesor de la lámina colocada directamente sobre el plano de vidrio y la diferencia entre ambas medidas da el diámetro del hilo.

Para medir el radio de una esfera se coloca sobre ella el esferóme-

tro después de levantar la punta P, y se gira el tambor hasta que dicha punta se ponga en contacto con la esfera; se anota la división que se lee en la regla R y la división del tambor situada frente a su borde biselado. Se vuelve a colocar el esferómetro sobre el plano de vidrio y se gira el tambor hasta que la punta P se ponga en contacto con dicho plano de vidrio; se hacen las lecturas correspondientes, que permiten determinar la distancia PO = h del polo de la esfera al centro O del triángulo equilátero que forman las puntas A, B, C del trípode; el radio de este círculo es $r = a/\sqrt{3}$, siendo a la longitud conocida o fácilmente medible de uno de los lados del triángulo A, B, C. Una vez medida la altura h y conocido r, se deduce fácilmente el radio R de la esfera por la relación OP × OB = AO², es decir, con las nociones indicadas, $h\,(2R - h) = r^2$, de donde

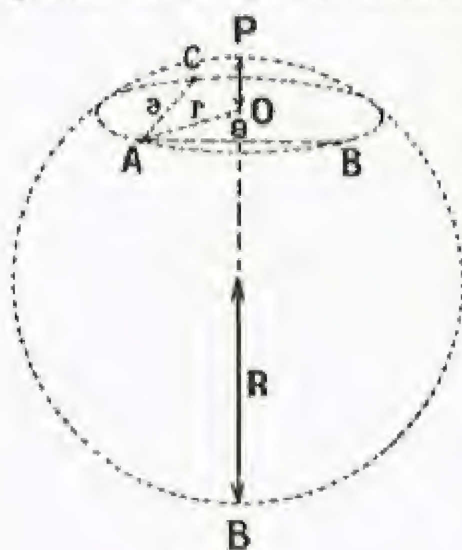


Fig. 11

$$R = \frac{1}{2}\left(h + \frac{r^2}{h}\right) \quad [fig.\ 11].$$

Según lo que acaba de decirse, se ve que con un esferómetro cuya distancia entre las puntas es a sólo pueden medirse los radios mayores que $a/\sqrt{3}$, puesto que la condición de contacto de las tres puntas A,B,C sobre una superficie esférica es, evidentemente $r < R$.

Medidas interferenciales. — Es posible medir con gran precisión la longitud de onda de una radiación luminosa monocromática por medio de interferómetros, tales como las láminas semiplateadas o las cuñas de aire. (V. Óptica física, pág. 102.)

Inversamente, puede compararse una longitud con la longitud de onda de una radiación monocromática; ello equivale a medir esta longitud tomando como unidad la longitud de onda. En general, se utiliza la raya roja, muy fina, emitida por el cadmio incandescente, cuya longitud de onda es 0,64384697 micras. Así se ha medido la longitud del metro patrón con una aproximación de una diezmillonésima. Se emplea frecuentemente este método para medir longitudes muy pequeñas.

Medida de masas

Principio de la medida. — Medir una masa es compararla con la masa de un cuerpo que se toma como unidad. Contrariamente a su peso, la masa de un cuerpo tiene un valor constante independiente de las condiciones en que se encuentra el cuerpo (v. pág. 177). Esta comparación se hace por medio de la balanza, valiéndose de masas marcadas que se determinan a partir de unidades de masa. Al final del capítulo veremos cómo puede medirse también el peso de un cuerpo, pero éste depende del lugar donde se hace la medida, a causa de las variaciones de la intensidad de la gravedad (v. pág. 9).

Unidades. — La unidad de masa es la masa del kilogramo patrón (V. Aritmética y Álgebra, p. 37, v. V); se utiliza también el gramo, que es su milésima parte, y la tonelada, que vale 1 000 kg.

Noticia histórica de la balanza. — La balanza ya era conocida en la Antigüedad: la Biblia la menciona *(Abraham)*, y también la cita Homero, etc. La balanza de brazos iguales y de platillos se atribuye a *Palamedes* (sitio de Troya). La balanza romana de brazos desiguales y de cursor de peso constante es de origen árabe.

La balanza de **Roberval** fue inventada en 1670.

Definición de la balanza. — Se denominan "balanzas" ciertos aparatos, de construcción muy diversa, que sirven para la medida absoluta de las masas y para la medida relativa de los pesos.

La balanza está constituida, en esencia, por un sólido móvil alrededor de un eje, es decir, por una palanca de primer género de brazos teóricamente iguales. Esta palanca o sólido de revolución se denomina "cruz", y en sus extremidades se pueden colocar dos pesos P_1 y P_2.

La balanza permite conocer la relación $\frac{P_1}{P_2}$. Como $P_1 = m_1 g$ y $P_2 = m_2 g$: $\frac{P_1}{P_2} = \frac{m_1}{m_2}$.

El teorema fundamental de la balanza es el siguiente:

Teorema. *La condición necesaria y suficiente para que un cuerpo sólido, móvil alrededor de un eje, esté en equilibrio, es que la suma de los momentos de las fuerzas con respecto al eje que tienden a hacer girar el cuerpo en un sentido, sea igual a la suma de los momentos de las fuerzas que tienden a hacerle girar en sentido contrario.*

Conociendo m_1, se deduce m_2, pero el conocimiento de P_1 y P_2 exige el conocimiento de la aceleración g de la gravedad en el lugar de la medida.

Diversos tipos de balanzas. — No es posible describir completamente los tipos, muy numerosos, de balanzas. Estos tipos varían según la magnitud de las masas que hay que comparar, y de la forma y volumen de los cuerpos cuyos pesos se trata de obtener.

No obstante, la discusión de las condiciones de una buena utilización de las balanzas ha conducido a poner en evidencia cierto número de cualidades que deben tener, cualquiera que sea su tipo, y a determinar los métodos generales que conviene emplear para obtener pesadas correctas. Esto es lo que vamos a demostrar, estudiando con cierto detalle un modelo particular de balanza utilizada corrientemente por los físicos, químicos y farmacéuticos.

Balanza de laboratorio. — Las balanzas de laboratorio constan esencialmente de una pieza sólida, denominada "cruz", móvil alrededor de un eje horizontal.

Este eje está constituido por la arista de un prisma triangular, de acero duro, denominado "cuchillo" e inserta en la cruz (*fig.* 12). La arista del cuchillo descansa en un plano horizontal de acero duro o de ágata, situado en la parte superior de una columna de soporte, que está a su vez montada, directamente o por medio de un zócalo, sobre tres tornillos de ajuste que permiten obtener la horizontalidad absoluta del plano que sirve de soporte.

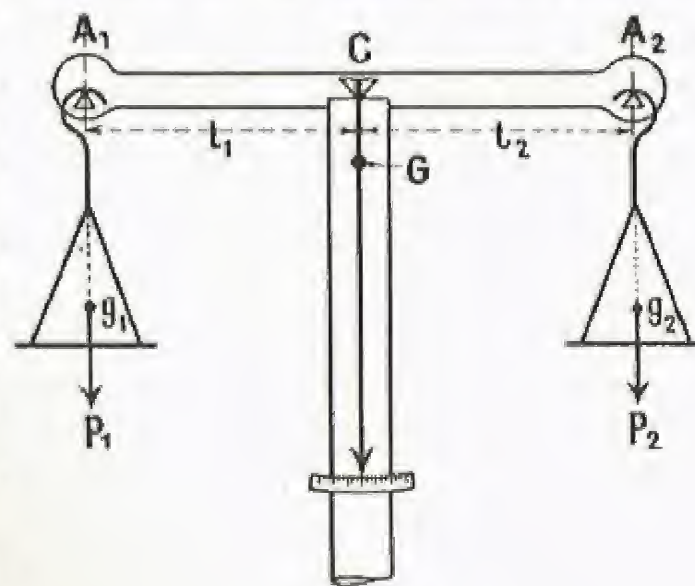


Fig. 12

La cruz de la balanza lleva además en sus extremos sendos cuchillos, de los cuales penden platillos iguales en los que se colocan las masas que hay que comparar. En su centro, rígidamente unida y perpendicular a ella, lleva una larga aguja que se desplaza ante una escala graduada y que permite determinar su posición.

Teoría de la balanza. — Consideremos, primeramente, la cruz sola, sin los platillos; la experiencia muestra que adopta una posición de equilibrio (reposo).

La cruz está sometida a su peso, aplicado en su centro de gravedad G, y a las fuerzas de reacción del soporte sobre la arista del cuchillo; estas últimas fuerzas, como se encuentran con el eje, tienen momentos nulos; para conseguir el equilibrio será, pues, necesario y suficiente que el momento del peso de la cruz con respecto al eje sea nulo, lo que exige que el peso de la cruz (fuerza vertical) encuentre el eje, es decir, que el centro de gravedad de la cruz esté en el plano vertical de la arista del cuchillo.

Cuando se cumple esta condición, la aguja que mueve la cruz ocupa una posición bien determinada en la escala ante la cual se desplaza, posición llamada "cero" de la balanza.

La teoría de la balanza es particularmente sencilla si las aristas de los dos cuchillos de las extremidades son paralelas a la arista del cuchillo central y están situadas en un mismo plano horizontal cuando la balanza está en el punto cero; supondremos que el constructor ha conseguido que se cumpla exactamente esta condición.

Se denominan *brazos de la cruz* las distancias l_1 y l_2 de la arista del cuchillo central C a las aristas A_1 y A_2 de los cuchillos de las extremidades (*fig.* 13).

Al colgar los platillos, muestra la experiencia que cada uno de ellos adopta una posición de equilibrio; teniendo en cuenta que un platillo es un cuerpo sólido móvil alrededor de un eje, resultará de lo anterior que en esta posición de equilibrio el centro de gravedad de cada platillo está situado en el plano vertical de la arista de su cuchillo de suspensión; la situación es la misma que si el peso de cada platillo se aplicará directamente a esta arista.

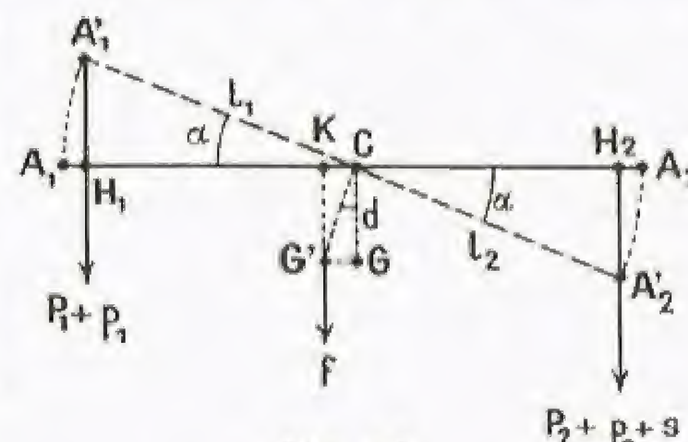


Fig. 13

Los pesos de los platillos p_1 y p_2 se escogen de forma que, al colgarlos vacíos, la aguja de la balanza marque cero. ¿Cuál será la condición para que esto se verifique? Teniendo en cuenta que el conjunto constituye un cuerpo sólido móvil alrededor de la arista del cuchillo central, expresemos, aplicando el teorema fundamental, la igualdad de los momentos de las fuerzas que tienden a hacer girar el sistema en sentidos opuestos.

El peso p_1 del platillo 1 se aplica en A_1, y su momento con respecto al eje es $p_1 l_1$; el peso del platillo 2 se aplica en A_2, y su momento con respecto al eje es $p_2 l_2$; el momento del peso de la cruz es nulo, porque en la posición cero de la balanza el centro de gravedad de la cruz está situado en el plano vertical de la arista del cuchillo C; por consiguiente, la condición para que la aguja de la balanza marque cero, estando los platillos vacíos, será (2) $p_1 l_1 = p_2 l_2$.

Los constructores procuran que se cumpla esta condición, y para asegurarse de ello es necesario comprobar que al colgar los platillos vacíos la aguja señala cero; de no ser así, habrá que colocar sobre uno de los platillos una sobrecarga adecuada.

Método de simple pesada. — Un método usual de pesada, denominado de "simple pesada", consiste en colocar el cuerpo que hay que pesar en uno de los platillos, por ejemplo el platillo 1, colocando en el otro platillo masas conocidas hasta que la aguja marque cero.

Cuando se coloca un cuerpo de peso P_1 en el platillo 1, este platillo toma una posición de equilibrio, para lo cual el centro de gravedad del sistema constituido por el platillo y el cuerpo en él colocado está situado en el plano vertical de la arista A_1; por consiguiente, puede considerarse el peso $P_1 + p_1$ como aplicado en A_1; análogamente, el peso $P_2 + p_2$ se aplica en A_2.

Expresemos que la balanza está en equilibrio y que la aguja señala la división cero. Se tendrá

(3) $(P_1 + p_1)\, l_1 = (P_2 + p_2)\, l_2,$

pero, teniendo en cuenta (2), esta condición se reduce a

(4) $P_1 l_1 = P_2 l_2.$

Si $l_1 = l_2$, se tendrá $P_1 = P_2$, $m_1 = m_2$.

Precisión de una balanza. — Una balanza es precisa si permite establecer la igualdad de dos pesos colocados simultáneamente en los dos platillos. Los dos brazos de la cruz tendrán que ser, pues, rigurosamente iguales.

Aunque los constructores se esfuerzan por realizar esta condición, es imposible conseguir una precisión suficiente; habrá que prescindir de este método de pesada simple en todas las medidas de precisión.

Antes de utilizar una balanza debe comprobarse hasta qué grado es justa; para ello se hace que la aguja señale el cero con dos pesos P_1 y P_2, con lo cual se verifica la condición (4); después se cambian los pesos de platillo, y si la aguja vuelve a señalar cero, es que se verificará también (4') $P_2 l_1 = P_1 l_2$ y, por consiguiente, sumando (4) y (4') se tendrá la igualdad $(P_1 + P_2)\, l_1 = (P_1 + P_2)\, l_2$, es decir, $l_1 = l_2$, lo que indica que la balanza es precisa; en el caso contrario, la balanza es falsa.

Se verá que es posible hacer pesadas exactas con una balanza que no sea precisa, a condición de que sea "fiel" y "sensible".

Sensibilidad de una balanza. — Supongamos que la balanza marca cero cuando tiene los pesos P_1 y P_2 en los platillos, y añadamos una pequeña sobrecarga s en el platillo P_2; si la aguja se desplaza claramente ante la escala, girando un ángulo α apreciable, se dirá que la balanza es sensible a esta sobrecarga. Mediante ensayos sucesivos con sobrecargas cada vez más pequeñas se determinará el valor de la sobrecarga a partir de la cual la aguja deja de desplazarse de manera visible. Este valor es el del error absoluto que se cometerá en las medidas, y es conveniente que sea el menor posible, es decir, que para una sobrecarga lo menor posible la aguja de la balanza gire el mayor ángulo posible.

La sensibilidad S de una balanza se define, por consiguiente, por la relación $S = \dfrac{\alpha}{s}$. Según esta definición, la sensibilidad de una balanza será mayor cuanto mayor sea el ángulo de rotación de su aguja con una misma sobrecarga, o bien cuanto más pequeña sea la sobrecarga necesaria para producir un mismo ángulo de rotación.

Se comprueba fácilmente (*fig.* 13) de qué depende la sensibilidad de una balanza. Supongamos que con los pesos P_1 y P_2 de los platillos la aguja marca cero: se tendrá la relación (5) $(P_1 + p_1) \cdot l_1 = (P_2 + p_2)\, l_2$; coloquemos una sobrecarga s en el platillo 2; la cruz se inclinará y sea α el ángulo de inclinación (igual al ángulo de rotación de la aguja) cuando la balanza se inmoviliza en su nueva posición; el punto A_1 viene a A'_2, A_2 ocupa el lugar de A'_2 y el centro de gravedad de la cruz G se sitúa en G'. Expresando la condición de equilibrio se tendrá:

(6) $(P_1 + p_1)\, CH_1 + f \cdot CK = (P_2 + p_2 + s) \cdot CH_2,$

o (6') $(P_1 + p_1)\, l_1 \cos\alpha + f \cdot d \operatorname{sen}\alpha = (P_2 + p_2 + s)\, l_2 \cos\alpha,$
llamando d a la distancia CG, lo que puede simplificarse si se tiene en cuenta (5):

(7) $f \cdot d \operatorname{sen}\alpha = s l_2 \cos\alpha$, de donde $\dfrac{\operatorname{tg}\alpha}{s} = \dfrac{l_2}{f \cdot d}.$

Para las sobrecargas pequeñas el ángulo α es pequeño y su valor en radianes es prácticamente igual al de $\operatorname{tg}\alpha$; se tendrá, pues,

(8) $S = \dfrac{l}{f \cdot d},$

siendo l la longitud de uno de los brazos de la cruz.

Esta relación muestra que la sensibilidad varía en razón inversa de la distancia d del centro de gravedad de la cruz a la arista del cuchillo; se aumenta la sensibilidad disminuyendo esta distancia, para lo cual las balanzas de precisión llevan en la cruz, encima del cuchillo central, un tornillo con una tuerca; elevando o descendiendo la tuerca se eleva o desciende el centro de gravedad de la cruz, con lo que se regula la sensibilidad.

A medida que la sensibilidad aumenta, aumenta la sensibilidad de las oscilaciones de la balanza, y, por consiguiente, el tiempo necesario para efectuar una pesada; este inconveniente se remedia con un dispositivo de amortiguamiento (véase más adelante). Incluso con un amortiguador, d no puede disminuir más allá de cierto límite, ya que, en caso contrario, tg α sería infinitamente grande para la menor sobrecarga, y la cruz oscilaría 90° (balanza "loca").

La fórmula (8) indica que para aumentar la sensibilidad conviene aumentar la longitud de la cruz y disminuir su peso. Estas dos condiciones son contradictorias, ya que no puede aumentarse la longitud de la cruz sin que aumente a la vez su peso. La experiencia ha mostrado que es preferible utilizar cruces cortas, ligeras y triangulares.

La razón principal es que con las cruces cortas se evitan las deformaciones mecánicas, cuestión que es importante en la práctica. En los cálculos anteriores se ha supuesto implícitamente que la cruz es indeformable, ya que se ha supuesto que las longitudes l_1 y l_2 siguen siendo las mismas para pesos P_1 y P_2 cualesquiera.

En la realidad no sucede así, y, por consiguiente, la sensibilidad depende ligeramente de la carga de los platillos. En las medidas de precisión se hacen todas las pesadas con carga constante.

Fidelidad de una balanza. Cualidad esencial. — Supongamos que se repite varias veces la misma pesada: se dice que la balanza es "fiel" cuando los resultados de las medidas son idénticos, dentro de los límites de los errores debidos a la sensibilidad de la balanza. No puede tenerse ninguna confianza en las indicaciones de la aguja de una balanza que no es fiel; tal balanza es inservible.

Una balanza es fiel cuando el cociente $\dfrac{l_1}{l_2}$ permanece rigurosamente constante, para lo cual es necesario que:

1° La cruz sea rígida, para suprimir todo riesgo de deformación accidental y cualquier flexión bajo el efecto de una carga demasiado fuerte.

2° Las variaciones de temperatura deben afectar igualmente a los dos brazos de la cruz.

3° Las aristas de los cuchillos deben ser muy finas y paralelas, pues de lo contrario el brazo de palanca de las fuerzas aplicadas sobre los cuchillos laterales sufrirían variaciones inadmisibles según la posición de los pesos en los platillos y la posición de los platillos sobre su cuchillo.

A reserva de su fidelidad, se verá que es posible efectuar pesadas cuya exactitud esté limitada únicamente por la sensibilidad, incluso si la balanza no es "precisa".

Método de doble pesada. — Se coloca en uno de los platillos, el platillo 1, por ejemplo, el cuerpo que hay que pesar, y en el platillo 2 un peso T, conocido o no, mayor que el del cuerpo y denominado "tara". Para comprobar que la balanza está en equilibrio cuando marca cero, se colocarán al lado del cuerpo los pesos marcados necesarios: sea P su suma, y C el peso del cuerpo. Se quita el cuerpo del platillo 1 y en su lugar se ponen pesos marcados hasta que la aguja indique de nuevo cero; sea P' la suma de los pesos marcados que equilibran la tara. Las ecuaciones de equilibrio serán

$$(P + C)\, l_1 = T\, l_2 \qquad P'\, l_1 = T\, l_2$$
$$(P + C)\, l_1 = P'\, l_1 \qquad C = P' - P.$$

Se ve que este método es correcto incluso si los brazos de la cruz son desiguales, pero exige que la balanza sea fiel, ya que se hacen dos pesadas sucesivas.

Caja de pesos. — Cualquiera que sea el método de pesada, es necesario tener a disposición cuerpos cuya masa se ha determinado por comparación con el kilogramo patrón. Se ha intentado obtener colecciones de masas marcadas, escogidas de tal manera que con un mínimo de ellas puedan obtenerse todas las masas posibles, de unidad en unidad, por ejemplo, de gramo en gramo, de kilogramo en kilogramo, etcétera. Tales colecciones se llaman "cajas de pesos".

La composición de una caja de pesos que permita efectuar todas las pesadas, con una aproximación de un gramo, será la siguiente:

Valor de los pesos en gramos:	1,	2,	5,	10,	20,	50;
Número de los pesos en cada valor:	1,	2,	1,	2,	1,	1.

Para pesos entre 50 g y 50 kg, se emplean bloques de bronce de forma troncopiramidal, provistos de un anillo.

Entre 1 g y 5 kg se emplean cilindros de latón o de acero inoxidable, con un botón en su parte superior.

Para los pesos inferiores al gramo se utilizan laminillas de platino, acero inoxidable o aluminio, una de cuyas esquinas está plegada en ángulo recto; estos pesos deben manipularse con pinzas.

Dispositivos particulares de las balanzas de gran precisión. — 1° *Amortiguamiento.* Las balanzas de gran precisión deben ser particularmente sensibles. Se ha visto que para que así sea es necesario que el centro de gravedad esté muy próximo a la arista del cuchillo de suspensión; en estas condiciones, la balanza constituye un péndulo compuesto cuya duración de oscilación es tanto mayor cuanto más sensible.

En el caso en que las substancias que haya que pesar se alteren, por ejemplo, sales que se hidratan en el aire, es necesario operar rápidamente, lo que se consigue utilizando un dispositivo de amortiguamiento que disminuye rápidamente la amplitud de las oscilaciones y su número, sin modificar la posición final de equilibrio de la balanza.

En las balanzas de Pierre Curie, el amortiguador está constituido por dos cilindros colocados debajo de los platillos; estos cilindros se desplazan, sin frotarlos, a lo largo de cilindros fijos soportados por el zócalo de la balanza, y el amortiguamiento se obtiene por la viscosidad de la capa de aire que se introduce entre los cilindros.

2° *Empleo de caballetes.* El manejo de pesos muy pequeños es muy delicado, y puede evitarse si se tiene en cuenta que un peso actúa según su momento con respecto al eje y que es equivalente, por ejemplo, colocar un peso de un miligramo en un platillo o un peso de un centigramo en la cruz, en un punto diez veces más cerca de la arista del cuchillo central. Esta observación es el origen del empleo de caballetes, que consisten en alambres curvados que se colocan, como caballetes, sobre la cruz, cuyos brazos están divididos en diez segmentos iguales.

3° *Protección.* Las balanzas de precisión están siempre protegidas por cajas de cristal, en cuyo interior se coloca una sustancia que evite la oxidación de las piezas metálicas. El operador no abre las puertas de la caja más que para colocar los pesos, a fin de evitar la acción de las corrientes de aire.

En ciertas balanzas se reemplaza la aguja por uno de los brazos de la cruz, que lleva en su extremidad una escala micrométrica que el operador puede leer desde el exterior por medio de un anteojo de poco aumento.

Las medidas de masas son de las más precisas; puede llegarse a pesar un kilogramo con una aproximación de un miligramo, lo que supone una precisión de una millonésima.

Balanza de Roberval. — La ventaja de la balanza de Roberval radica en que los platillos están encima de la cruz. Consiste en una cruz AB, móvil alrededor de un cuchillo O, y de una barra A'B' denominada contracruz, móvil alrededor del eje fijo O' paralelo a O. Dos barras verticales, articuladas en AA' y BB', mantienen paralelas la cruz y la contracruz, a la vez que sostienen los platillos. De esta forma se tiene un paralelogramo deformable cuyos puntos O y O' permanecen fijos (*fig.* 14).

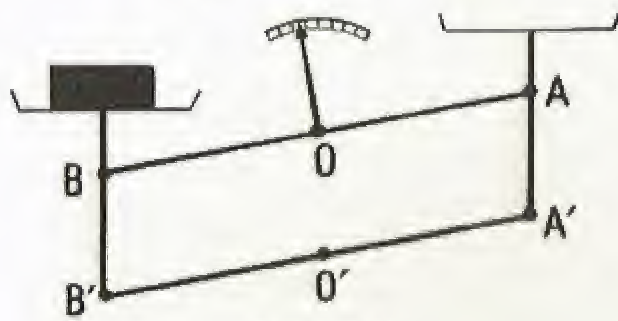


Fig. 14

Cuando se carga uno de los platillos, las barras AA' y BB' permanecen verticales, y los platillos que soportan, horizontales.

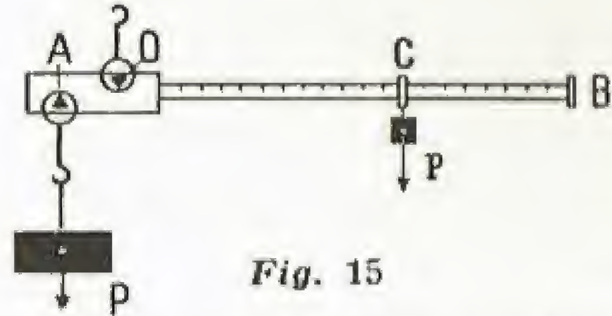


Fig. 15

Balanza romana. — Balanza romana es la compuesta por una cruz AB, móvil alrededor de un cuchillo O, mientras que otro cuchillo, A, soporta el peso que hay que pesar. Un cursor, C, puede desplazarse a lo largo de la porción graduada OB. Su peso p actúa mediante el brazo de palanca OC. Sea P el peso que desea medirse; suponiendo el centro de gravedad de la cruz en el plano vertical O, se tendrá, en el equilibrio:

$$P \cdot OA = p \cdot OC \quad y \quad P = \frac{p}{OA} \cdot OC.$$

Como p y OA son fijos, P será proporcional a OC, y podrá graduarse OB directamente en peso. Este aparato es pesado, incómodo y poco sensible, pero permite evitar la manipulación de los pesos (*fig.* 15).

Balanzas automáticas. — Estos instrumentos reemplazan cada vez más las balanzas de Roberval o las romanas, y evitan también la manipulación de numerosos pesos, a la vez que permiten pesadas muy rápidas, aunque no muy precisas.

Un tipo sencillo consiste en un cuerpo bastante pesado (contrapeso) Q, que puede girar alrededor de un eje O. Alrededor de este eje se talla el contrapeso en forma de cilindro, de eje O y de radio r, y una cinta de acero fijada en a se arrolla en parte sobre el cilindro y soporta el peso P que hay que medir. Si llamamos Q el peso del contrapeso y G su centro de gravedad, se tendrá en el equilibrio (*fig.* 16)

$$P \cdot r = OH \cdot Q.$$

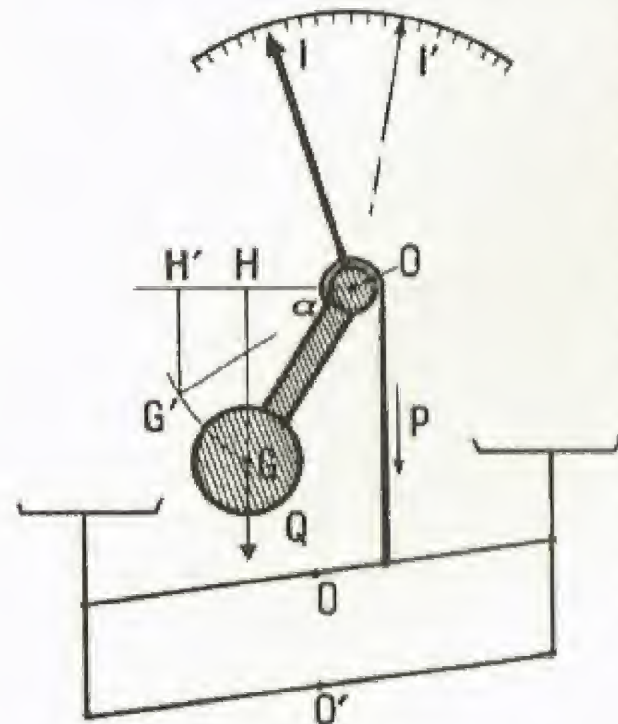


Fig. 16

Substituyamos P por P', mayor: el contrapeso se elevará, G vendrá a G' y se tendrá

$$P \cdot r = OH' \cdot Q.$$

La punta de la aguja I, solidaria del contrapeso, vendrá a I' ante un limbo que se puede graduar directamente en pesos.

Este dispositivo puede asociarse a una balanza del tipo Roberval, como se representa en la figura 16, o a una báscula del tipo Quintenz.

Báscula de Quintenz. — La *báscula de Quintenz* (*fig.* 17), utilizada para pesar grandes cargas (maletas, animales, vagones, etc.), es la báscula empleada en el comercio. Se compone de una plataforma AB, uno de cuyos bordes se levanta en BC y se apoya, por una parte, en D, sobre la palanca EF, y por la otra, sobre la pieza G, por medio de la barra CG. La palanca EF, móvil en E, actúa sobre el extremo inferior de la barra GI, de forma que el peso de un cuerpo depositado en la plataforma tiende a hacer descender ambas barras, y por consiguiente el brazo de palanca HK a la cual están ligadas. La palanca HL es móvil alrededor del punto K; uno de sus extremos soporta el peso del cuerpo que hay que pesar y el otro un platillo P en el que se colocan pesos. La relación entre las dimensiones es

Fig. 17

$$\frac{ED}{EF} = \frac{IK}{HK} \quad y \quad \frac{IK}{KL} = \frac{1}{10}.$$

Admitamos que cuando AB no soporta cuerpo alguno, la palanca HL está en equilibrio y en posición horizontal. Coloquemos un cuerpo en AB: la fuerza resultante se repartirá entre los dos puntos de apoyo D y G. La fuerza aplicada en G se transmitirá íntegramente a I. La otra fuerza, que denominaremos π, y que actúa en D, producirá un empuje

$$\pi \cdot \frac{ED}{EF} \text{ o } - \pi \frac{IK}{HK} \text{ aplicado en F.}$$

Este último empuje se transmitirá a H, sobre el cual producirá el mismo efecto que un empuje

$$\pi \cdot \frac{IK}{HK} \cdot \frac{HK}{IK} = \pi \text{ aplicado en I.}$$

Ocurrirá, pues, como si la segunda porción del peso actuara directamente sobre I. La palanca HL se encuentra en las mismas condiciones que si se aplicara todo el peso del cuerpo en I.

Como $\frac{IK}{KL} = \frac{1}{10}$, para establecer el equilibrio habrá que poner en el platillo P un peso diez veces menor que el del cuerpo.

La báscula se asocia con frecuencia a una cruz de balanza romana.

Corrección de las pesadas hechas en el aire. — En el seno del aire, todo cuerpo está sometido al empuje de Arquímedes (v. ESTÁTICA DE LOS GASES (pág. 27), que disminuye su peso real. Consideremos una pesada simple hecha en el aire con una balanza. Se comprueba la igualdad de dos fuerzas: una es el peso real X del cuerpo estudiado, menos el empuje de Arquímedes f a que está sometido; la otra es el peso real P de los pesos marcados, menos el empuje f' a que están sometidos.

Llamemos a, a' y a_0, respectivamente, a los pesos específicos del cuerpo, de los pesos marcados y del aire. Se tendrá

$$f = \frac{X}{a} a_0, \qquad f' = \frac{P}{a'} a_0,$$

$$X - \frac{X}{a} a_0 = P - \frac{P}{a'} a_0$$

$$X - P = a_0 \left[\frac{X}{a} - \frac{P}{a'}\right].$$

Como X y P son muy aproximados, el error absoluto cometido al determinar X será

$$X - P = a_0 \cdot P \left[\frac{1}{a} - \frac{1}{a'}\right].$$

Este error es proporcional al peso del cuerpo estudiado y será tanto mayor cuanto más diferentes sean los dos pesos específicos a y a'. En el caso de pesadas de precisión no puede despreciarse; para calcularlo hay que conocer los diferentes pesos específicos.

Medidas de pesos y de fuerzas

Principio de la medida. — Para medir los pesos y las fuerzas se utilizan dinamómetros; estos aparatos aprovechan las deformaciones de los sólidos elásticos, deformaciones que se gradúan directamente en fuerzas por comparación. Las unidades de fuerza se establecen a partir del kilogramo patrón. El peso del cuerpo varía según el lugar donde se mide. Los dinamómetros tienen una precisión relativa bastante mediocre.

Balanza de muelle. — En un cilindro L, que constituye la parte exterior del aparato, se desliza una varilla T, sostenida por un muelle R provisto en su extremidad inferior de un gancho C, del que se cuelga el peso que hay que medir, P.

El muelle R se acorta por compresión, y este acortamiento es sensiblemente proporcional a la fuerza P que se ejerce sobre el gancho. La varilla P está graduada directamente en peso en la parte exterior del cilindro L (*fig.* 18).

En ciertas balanzas de este tipo, el muelle R se deforma por tracción y no por compresión.

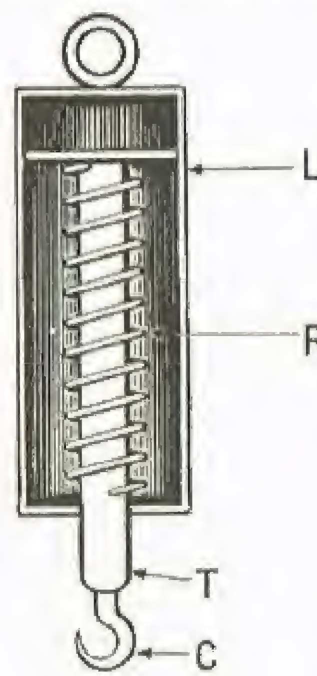


Fig. 18

Dinamómetros de láminas de acero. — La lámina elástica deformable tiene la forma de V. En sus dos extremos A y B van soldadas dos varillas en arco de círculo provistas de anillos y que resbalan, una ante la otra, cuando se ejercen fuerzas sobre ambos anillos. La lectura se hace directamente en a, sobre una de las varillas graduadas en kilogramos (*fig.* 19).

Dinamómetros líquidos. — Para medir fuerzas de gran intensidad se procede indirectamente midiendo las presiones que originan. La fuerza F que hay que medir actúa sobre un émbolo de superficie S, que comprime un líquido, por lo general aceite, en una bomba (*fig.* 20).

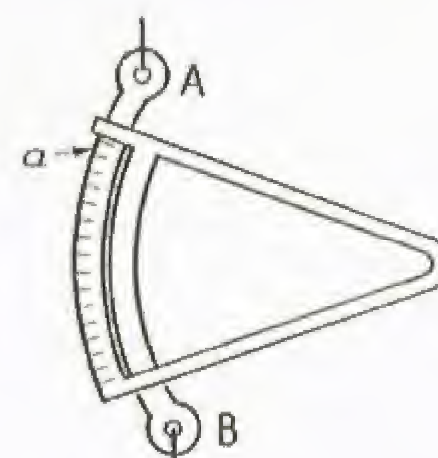


Fig. 19

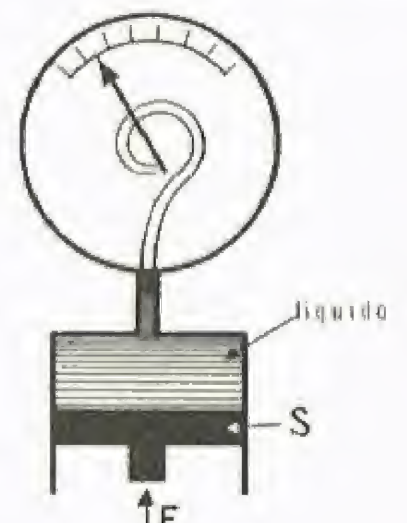


Fig. 20

La presión $p = \frac{F}{S}$ se transmite íntegramente por el líquido (v. HIDROSTÁTICA, pág. 20) al tubo de un manómetro metálico cuyas

indicaciones son, por consiguiente, proporcionales a F. Este aparato se gradúa, como los demás dinamómetros, por medio de fuerzas conocidas, y el limbo está graduado en unidades de fuerza.

Medida del tiempo

Principio de la medida. — Pueden distinguirse dos clases de medidas: la determinación de la hora, que se hace en los observatorios estudiando la posición de las estrellas y que se conserva en relojes a los cuales se ajustan los relojes de las casas, y la medida de los intervalos de tiempo, por ejemplo, la medida de la duración de un fenómeno. Los aparatos que se emplean para esta última clase de medidas dependen del intervalo de tiempo que se deba medir.

Unidad. — La unidad de tiempo se determina en astronomía (v. página 262, vol. V), y ésta, que es el segundo de tiempo solar medio, es la 86 400ª parte del día solar medio, que no tiene existencia real. La unidad está relacionada con el día sidéreo, que es el único accesible a la experiencia, y que consta, aproximadamente, de 86 164 segundos.

Reloj. — Los relojes se componen esencialmente de dos grupos de mecanismos; el primero consta de un motor cuyo eje pone en movimiento de rotación, mediante desmultiplicaciones convenientes, agujas que se desplazan ante un cuadrante circular en el que se han marcado graduaciones equidistantes en horas, minutos, segundos... Para accionar el motor se recurre a muy diversos tipos de energía: un peso levantado (péndulos); un muelle tenso (relojes); energía eléctrica o aire comprimido (relojes de péndulo de las ciudades), etc.

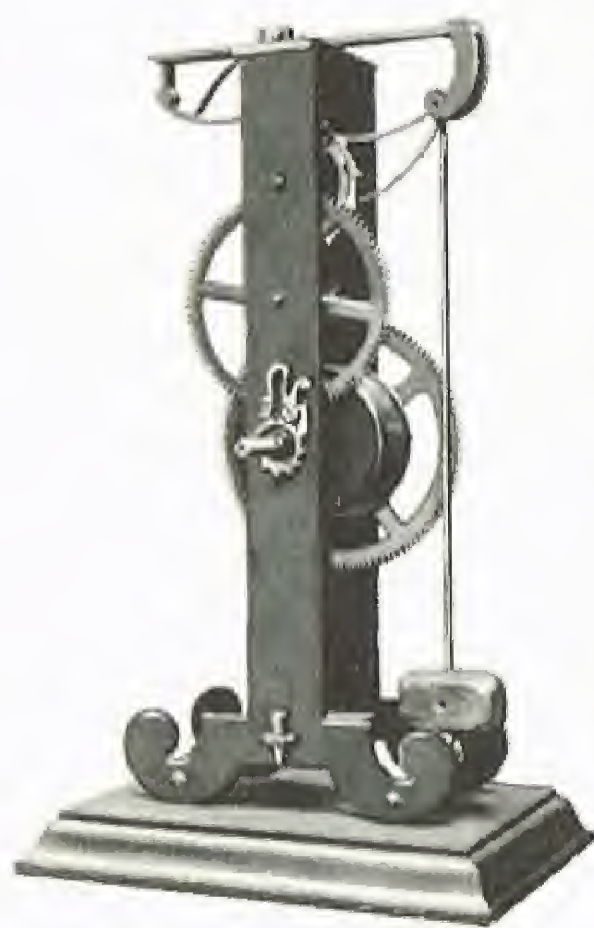


Fig. 21.—Aplicación del péndulo a la relojería, según un dibujo del hijo de Galileo, con arreglo a las indicaciones de su padre *(Fot. Alinari)*

Cualquiera que sea la naturaleza del motor, es necesario regularizar perfectamente su movimiento para que a intervalos iguales de tiempo correspondan ángulos de rotación de las agujas iguales, es decir, adelantos de tiempo (indicados por el cuadrante) iguales.

El segundo grupo de mecanismos sirve para regularizar el movimiento del motor. Este mecanismo consta de un cuerpo cuyos movimientos son rigurosamente periódicos, es decir, que cada una de sus oscilaciones dura un tiempo constante. Existen de varios tipos.

a) *Relojes de arena y clépsidras.* Estos aparatos utilizan el paso regular de arena fina o de agua por una abertura pequeña: la cantidad que fluye es proporcional al tiempo.

b) *Relojes de volante.* Este mecanismo regulador consta esencialmente de un péndulo que a cada oscilación, es decir, a intervalos iguales de tiempo (oscilaciones simples o dobles del péndulo), deja libre el motor y por consiguiente permite que las agujas giren ángulos bien determinados que corresponden en el cuadrante a intervalos iguales de tiempo (*figura* 21).

El movimiento del péndulo está mantenido por el motor, por medio de un dispositivo denominado escape, o bien eléctricamente, de forma que su amplitud permanezca constante.

Se dice que el reloj está "ajustado" cuando el adelanto de tiempo que marcan las agujas para cada oscilación del péndulo es exactamente igual a la duración efectiva de la oscilación. Si a cada oscilación del péndulo, por ejemplo, las agujas giran un ángulo que corresponde en el cuadrante a un adelanto de un segundo, el reloj sólo estará ajustado cuando la duración de la oscilación del péndulo sea efectivamente de un segundo. Cualquier causa capaz de modificar el período del péndulo desajusta el reloj; ello puede deberse a una variación de la temperatura, o a una variación de la aceleración de la gravedad g. Para remediarlo, se recurre a péndulos compensados, cuya longitud puede variarse ligeramente (v. pág. 37).

c) *Relojes de diapasón.* El avance del motor se regula por las oscilaciones de un diapasón, sostenido eléctricamente, y cuya temperatura debe mantenerse rigurosamente constante. Los diapasones de los relojes del Observatorio de París tienen una frecuencia de mil oscilaciones por segundo.

d) *Relojes de cuarzo.* Una lámina de cuarzo sometida a una diferencia de potencial alterna, se contrae y se dilata según el sentido de esta diferencia de potencial, cuando la frecuencia tiene un cierto valor denominado *frecuencia de resonancia*, que depende de las dimensiones geométricas de la lámina.

Esta frecuencia se mantiene constante, pero es muy elevada, del orden de las que se obtienen con circuitos oscilantes de lámparas de tres electrodos: para un milímetro de espesor, es de tres millones de ciclos por segundo. La corriente del propio circuito oscilante es la que hace avanzar la aguja del reloj.

e) *Relojes de amoniaco.* El cuerpo oscilante está constituido por moléculas de amoniaco cuya frecuencia de oscilación es de varios miles de millones de ciclos por segundo.

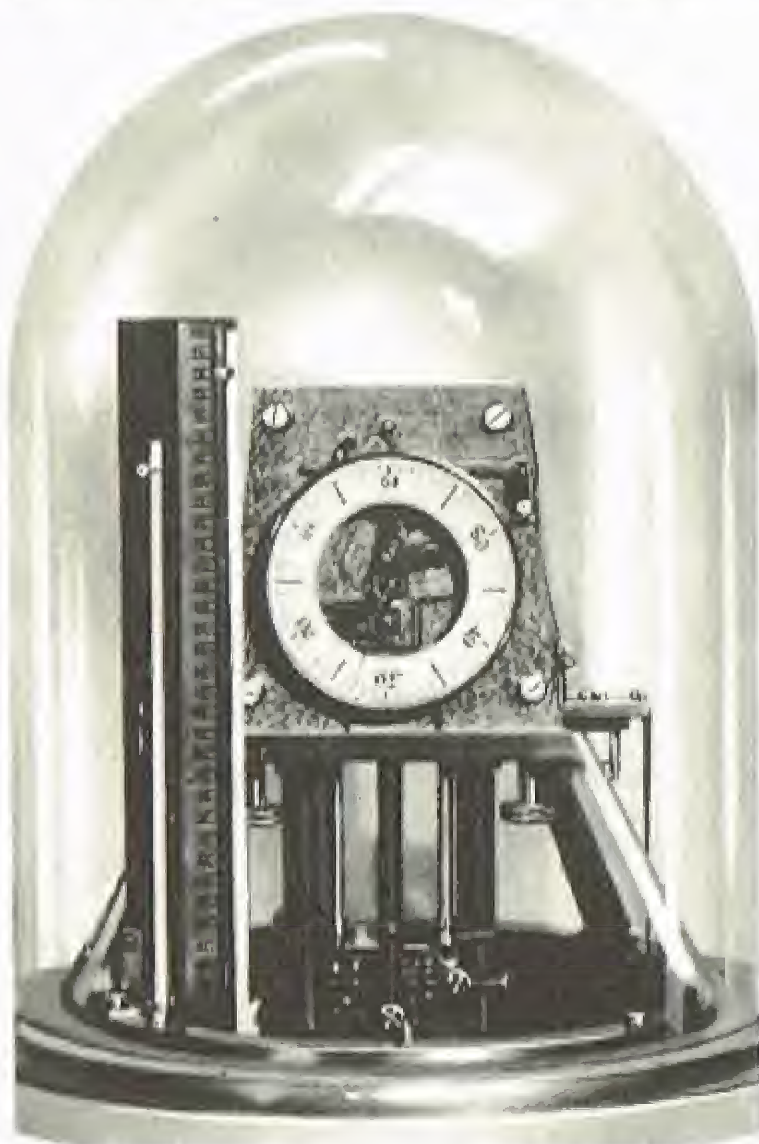
Medida de intervalos bastante largos. — Cuando puede admitirse en la medida de un intervalo de tiempo un error absoluto del orden de algunos segundos, basta con observar, sobre el cuadrante de los segundos de un reloj o de un cronómetro, las horas a las cuales comienza y acaba este intervalo. Con un poco de costumbre puede leerse cada una de estas horas con un error no superior a un segundo; puede también escucharse las oscilaciones de un péndulo y contar el número de oscilaciones. Se utiliza un péndulo de período fijo, por lo general un segundo, o un péndulo cuyo período puede regularse desplazando su centro de gravedad con respecto al eje de oscilación (metrónomo).

Medida de intervalos cortos de tiempo. — Cuando el error tenga que ser inferior al segundo, hay que recurrir a un procedimiento de registro. Sobre una banda de papel que se desenrolla uniformemente se inscriben señales que corresponden al principio y al fin del intervalo de tiempo, y se mide su distancia. Si la velocidad de desarrollo es, por ejemplo, de un metro por segundo, y se determina la posición de una señal con una aproximación de una décima de milímetro, el error en el instante será de una diezmilésima de segundo, como máximo. Es necesario que la velocidad a que se desarrolla el papel sea constante.

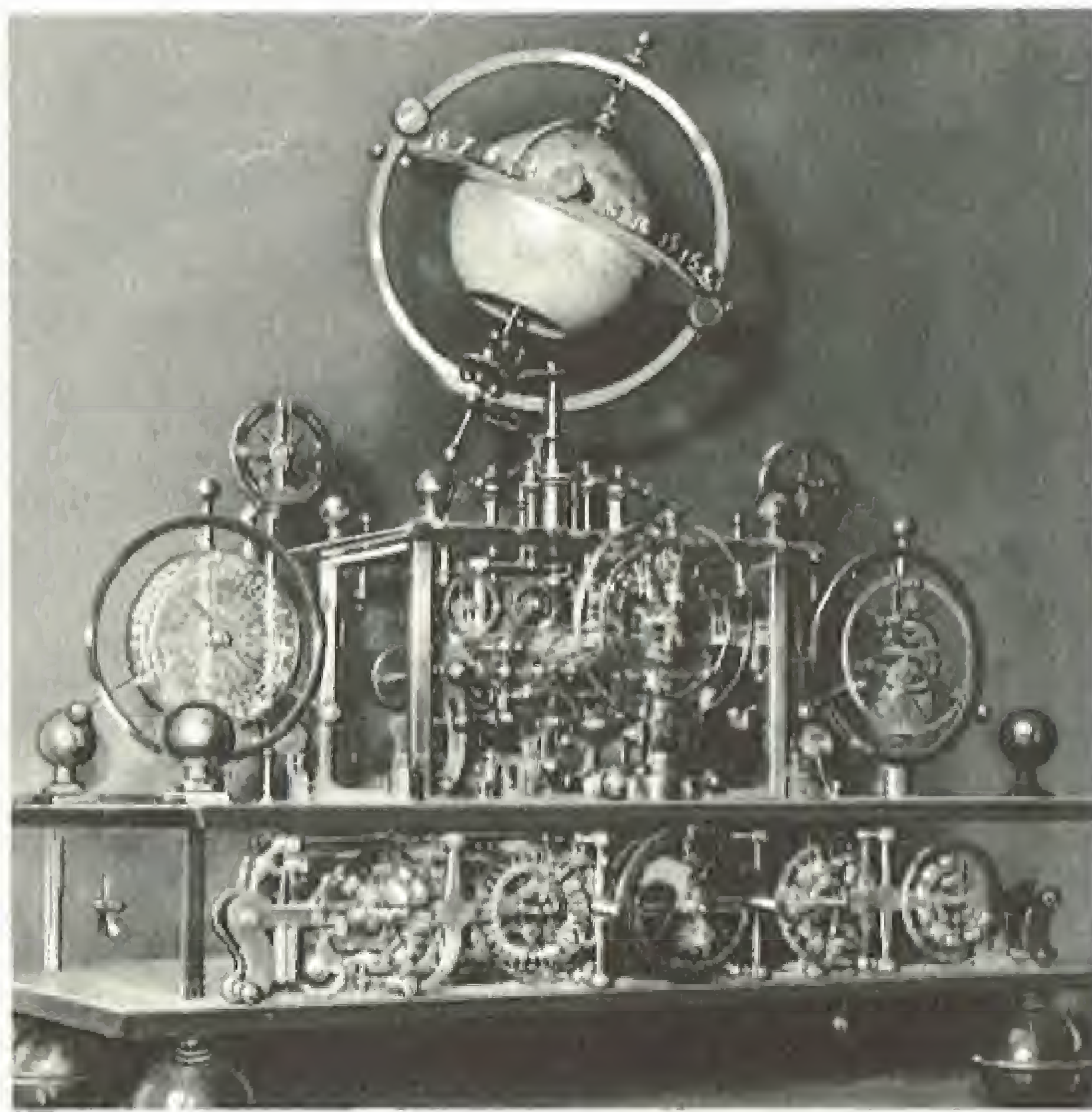
Cuando no se está seguro de esta constancia, se registran simultáneamente las oscilaciones de un diapasón de período conocido, o las de un cuarzo, si el intervalo de tiempo es muy pequeño. Basta entonces con contar el número de oscilaciones del diapasón o del cuarzo para tener el valor del intervalo de tiempo entre la señal del principio y la del fin (*fig.* 22).



Fig. 22



A la izquierda: Reloj guardia tiempo con balancín (Doc. Laboratorios Leroy) [*Fot. Chevojon*]
A la derecha: Reloj de péndulo expuesto en el Museo Cognacq-Jay de París (Col. Obras maestras del oro y del tiempo). Pese a sus dimensiones reducidas (1 m × × 0,40 × 0,70), da la hora de todos los países y señala los días, meses y años, así como las fechas correspondientes a las fiestas de Resurrección. Proporciona igualmente datos sobre la traslación, las lunaciones y los efectos del día y de la noche sobre el globo *(Fot. Keystone)*



Un gabinete de física, por Sebastián Le Clerc (Bibl. de la Escuela de Bellas Artes, París) [*Fot. Giraudon*]

Gravedad

Ley de caída de los cuerpos

Reseña histórica. Peso de los cuerpos. Dirección de la gravedad. Plomada. Centro de gravedad de un cuerpo. Intensidad del peso de un cuerpo. Caída de los cuerpos. Ley de caída en el vacío. Determinación experimental de la ley de los espacios mediante inscripción gráfica. Aparato de Morin. Método cronofotográfico. Enunciados de las leyes de caída en el vacío. Métodos indirectos para el estudio de la caída de los cuerpos. Método del plano inclinado de Galileo. Noción de masa. Método de la máquina de Atwood. Unidad C. G. S. de fuerza

Reseña histórica. — El concepto que en la Antigüedad se tenía de la gravedad se limitaba a la idea de que la velocidad de los cuerpos aumenta durante su caída, pero mientras unos sostenían que esta velocidad era proporcional a sus pesos **(Aristóteles)**, otros **(Epicuro, Lucrecio)** admitían que la velocidad de caída en el vacío sería la misma y que la causa de que ciertos cuerpos cayeran más lentamente era la resistencia del medio.

En 1602, **Galileo** descubrió las leyes de la caída de los cuerpos, que fueron vivamente combatidas en esa época por ser contrarias a las teorías aristotélicas; estas leyes fueron confirmadas posteriormente por los trabajos de **Huygens.** Más tarde, **Newton** (1687) demostró que la gravedad no es más que un caso particular de la atracción universal y que la fuerza que mantiene los planetas en sus órbitas es la misma que la que produce la caída de los cuerpos en la superficie de la tierra.

Atwood consiguió demostrar las leyes de la gravedad y medir la constante que interviene en estos fenómenos (1784).

El primer aparato destinado a estudiar la caída de los cuerpos lo inventó el **general Morin.**

La noción de masa se debe a Newton.

Galileo había ya adivinado la función de la resistencia del aire en la caída de los cuerpos. **Riccioli** y **Dechâles** intentaron calcular su valor, y también **Mariotte,** en 1670. Newton fue el primero que estableció una relación entre la resistencia y el cuadrado de la velocidad. **Robins** (1740), y **Borda** y **Buat** posteriormente rectificaron las fórmulas de Newton.

Peso de los cuerpos. — La suspensión de una carga requiere cierto esfuerzo, y se tiene la sensación de que la carga es atraída por el suelo: en efecto, si la abandonamos, cae; si la suspendemos de un muelle, el muelle se deforma. Inversamente, si lanzamos una piedra hacia arriba, en dirección vertical, su movimiento disminuye, acaba cesando por completo, y la piedra vuelve finalmente a caer al suelo.

Puesto que se denomina "fuerza" a toda causa capaz de provocar o modificar el movimiento de un cuerpo, o de producir su deformación, se dirá que en la proximidad de la tierra todo cuerpo está sometido a una fuerza denominada fuerza de gravedad o peso del cuerpo.

El *peso de un cuerpo* está caracterizado, como toda fuerza, por cuatro elementos: su punto de aplicación, su dirección, su sentido y su intensidad, y se representará por un vector.

Cuando las dimensiones de un cuerpo son lo suficientemente pequeñas para que pueda asimilársele a un punto, el punto de aplicación de la gravedad coincide con el propio punto material; así se supondrá, en principio, al hacer experimentos con una esferilla de plomo.

Dirección de la gravedad. Plomada. — Consideremos una esferilla de plomo suspendida del extremo de un hilo largo y flexible; se comprueba que la esferilla permanece inmóvil. Como se encuentra en reposo, las fuerzas que actúan sobre ellas están equilibradas. Estas fuerzas son el peso del plomo y la tensión del hilo ejercida en la misma dirección. Estas dos fuerzas no pueden estar en equilibrio más que si son iguales y directamente opuestas. Bastará, pues, con determinar exactamente la dirección del hilo extendido para conocer la dirección de la fuerza de la gravedad. Por medio de una escuadra puede mostrarse que la dirección del hilo es perpendicular a la superficie de un líquido en reposo; dicha dirección se denomina, por definición, "vertical" (*fig.* 23).

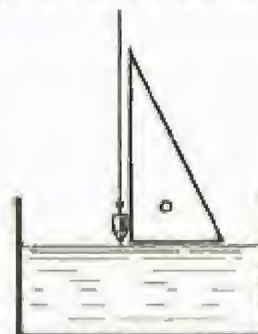


Fig. 23

Se dirá, pues, que la gravedad es "una fuerza vertical dirigida de arriba abajo".

La superficie de un líquido en reposo, siempre que no sea de gran extensión, es una superficie plana, de donde se deduce que en una región que no sea de gran extensión todas las direcciones de la plomada son prácticamente paralelas. Esta propiedad permite darse cuenta de la acción de la gravedad en el caso de un cuerpo que no pueda considerarse como un punto. Un cuerpo puede siempre considerarse como la agregación de un conjunto

de partículas materiales muy pequeñas; cada una de ellas estará sometida a su peso, y de acuerdo con lo que acaba de decirse, todos estos pesos elementales son fuerzas paralelas y del mimo sentido aplicadas a un cuerpo sólido. Su extensión es la misma que la de una fuerza única, denominada "resultante", igual a la suma de las fuerzas componentes, con su mismo sentido y aplicada en un punto denominado "centro de las fuerzas paralelas".

Centro de gravedad de un cuerpo. — Esta resultante se denomina "peso del cuerpo", y el centro de las fuerzas paralelas, "centro de gravedad del cuerpo". El centro de gravedad puede determinarse experimentalmente.

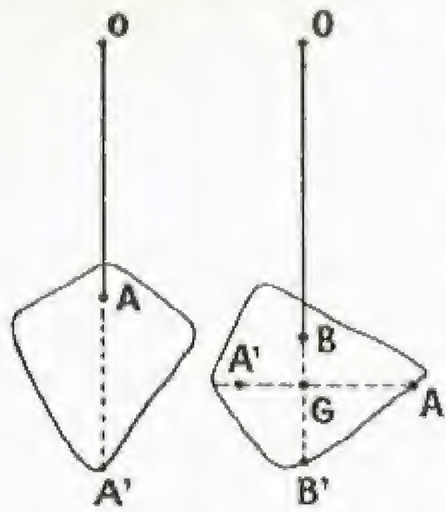
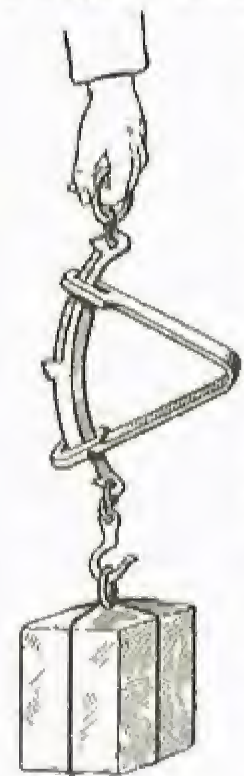


Fig. 24

Sea, por ejemplo, una lámina metálica delgada que se suspende de un hilo fino por uno de sus puntos A. Cuando la placa está inmóvil, las fuerzas que actúan sobre ella están equilibradas. Estas fuerzas son la tensión del hilo, ejercida en su misma dirección, y por consiguiente vertical, y las fuerzas de la gravedad cuya resultante debe ser igual y directamente opuesta a dicha tensión. Esta resultante se aplicará en un punto cualquiera de la dirección del hilo, es decir, según AA'; esta dirección podrá indicarse sobre la lámina metálica, y pasa por el centro de gravedad. Si la lámina se suspende de otro punto B, se trazará igualmente, prolongando el hilo, la recta BB', que cortará a la AA' en el centro de gravedad buscado G (*fig.* 24)

Intensidad del peso de un cuerpo. — Para medir la intensidad del peso de un cuerpo se puede equilibrar este peso con una fuerza conocida, por ejemplo la tensión de un muelle.


Fig. 25

Si se suspende un peso de la extremidad de un muelle, el muelle se alarga, aumentando su tensión; cuando dicha tensión equilibra el peso, el cuerpo se inmoviliza. La deformación del muelle, que es función de su tensión, puede servir para medir el peso del cuerpo, si dicha deformación se ha graduado previamente. Este método es poco preciso, y los aparatos que sirven para medir los pesos con arreglo a este principio se llaman "dinamómetros" o "balanzas de muelle" (*fig.* 25).

La comparación de los pesos de diferentes cuerpos puede deducirse más exactamente por comparación de sus masas por medio de balanzas (v. pág. 7, MEDIDA DE LAS MASAS).

Cuando se lleva a diferentes puntos de una región, que no tenga una extensión limitada, un muelle del que pende un peso, se comprueba que la deformación del muelle no varía; se deduce entonces que en tal región el peso del cuerpo conserva el mismo valor.

Este resultado no es absolutamente riguroso, y métodos de medida más precisos, que utilizan el péndulo, ponen de manifiesto que el peso de un cuerpo cambia según el lugar en que se encuentra, en función de la latitud y de la altura del lugar en que se hace la medida (v. MEDIDA DE *g*, pág. 7). Estas variaciones son muy pequeñas (1/200 del polo al ecuador) y pueden despreciarse en un medio de poca extensión.

Fig. 26.—Tubo de Newton para estudiar la caída de los cuerpos en el vacío (Conservatorio de Artes y Oficios de París)

Caída de los cuerpos. — Cuando se abandona un cuerpo a sí mismo se pone en movimiento hacia el suelo: el cuerpo cae. Esta caída se debe a la acción de su peso que, como ya se ha visto, conserva una intensidad, una dirección y un sentido constantes durante toda la caída.

Estudiar el movimientto de caída de un cuerpo es determinar, para cada duración de caída, la altura de caída correspondiente, así como la velocidad en cada instante.

Con más precisión: si se designa por h la altura de caída y por t el tiempo de caída, se trata de encontrar una relación matemática entre h y t que permita determinar h para cada valor de t, o inversamente; tal relación, $h = F(t)$, se denomina "ley de los espacios"; análogamente, se denomina "ley de las velocidad" la relación $v = f(t)$, que establece una relación entre la velocidad adquirida y la duración de la caída. Se desconocía *a priori* si la ley de los espacios y la ley de las velocidades eran las mismas para los diferentes cuerpos.

Si el medio de caída es el aire, la ley de los espacios y la ley de las velocidades varían de un cuerpo a otro; por ejemplo, un pedazo de plomo y una hoja de papel abandonados en el mismo instante no descienden unidos, sino que llegan al suelo en momentos muy diferentes y con velocidades también muy diferentes.

Ley de caída en el vacío. — **Galileo** y **Newton** demostraron que estas diferencias eran debidas a la acción del aire, que al frotar con los cuerpos que caen ejerce fuerzas muy variables, según sus formas y dimensiones. Newton demostró, en particular, que si los cuerpos pueden substraerse a la acción del aire, operando en el vacío, las leyes de caída son las mismas para todos los cuerpos (*fig.* 26).

Para estudiar el movimiento de caída bajo la acción de la gravedad exclusivamente, habrá, por consiguiente, que operar en el vacío, o más cómodamente, obtener condiciones tales que las fuerzas de rozamiento del aire sean despreciables con respecto a la gravedad, es decir, utilizar cuerpos de mucho peso y de dimensiones reducidas (las fuerzas de frotamiento aumentan con la superficie) y en un intervalo de velocidades no demasiado grandes (las fuerzas de frotamiento aumentan también con la velocidad): así es como se opera en la práctica.

Determinación experimental de la ley de los espacios mediante inscripción gráfica. — Se trata de determinar la relación $h = F(t)$, entre el espacio h recorrido durante la caída y la duración t de la caída.

El método general que emplean los físicos para encontrar la relación que existe entre dos magnitudes, x e y por ejemplo, que varían simultáneamente, es la siguiente: se miden cierto número de pares de valores de ambas magnitudes que se corresponden; se determinan, por ejemplo, experimentalmente, los valores y_1, y_2, y_3, ..., y_n, que toma y para los valores x_1, x_2, x_3,... x_n de x; se indican sobre un gráfico los puntos M_1, M_2, ..., M_n, cuyas coordenadas son respectivamente los valores x_1y_1, x_2y_2, ..., x_ny_n, contados sobre dos ejes rectangulares Ox, Oy. Después se unen los puntos M_1, M_2, ..., M_n por una curva continua. Esta curva representa las variaciones de y en función de x; si se puede encontrar una relación matemática $y = F(x)$, que represente la curva experimental, esta relación será la expresión matemática del fenómeno, y constituye su ley.

En el caso actual habrá que determinar experimentalmente las alturas h_1, h_2, h_3, ..., h_n, de caída al cabo de tiempos conocidos t_1, t_2, ..., t_n e indicar los puntos correspondientes sobre un gráfico, construir la curva y encontrar la función $h = F(t)$.

La dificultad práctica de este método se debe a que el movimiento de caída es tan rápido que es imposible observar con precisión la posición del cuerpo que cae en instantes bien determinados.

Aparato de Morin. — Para obviar esta dificultad se ha utilizado un método de registro: el aparato de Morin, compuesto por un cilindro, susceptible, por un procedimiento cualquiera (mecanismo de relojería, motor), de adquirir un movimiento de rotación uniforme alrededor de un eje vertical.

Se dispone una barra vertical paralelamente a una de las generatrices del cilindro; a lo largo de esta barra puede deslizarse un cuerpo de gran densidad, por ejemplo, un bloque troncocónico de plomo, a cuyo movimiento el aire ofrecerá poca resistencia. De esta forma, la fuerza de rozamiento debida al deslizamiento del bloque de plomo a lo largo de la varilla podrá despreciarse.

El bloque de plomo lleva un lápiz cuya punta se apoya muy ligeramente sobre una hoja de papel arrollada al cilindro.

Si el cilindro es inmóvil y se deja caer el bloque de plomo, la punta del lápiz trazará sobre el papel una vertical Oh; si el bloque se lleva a su posición de partida y se hace girar el cilindro, la punta del lápiz describirá una horizontal Ot, sobre la cual las longitudes corresponden a intervalos de tiempo iguales si, como se ha supuesto, la rotación del cilindro es uniforme.

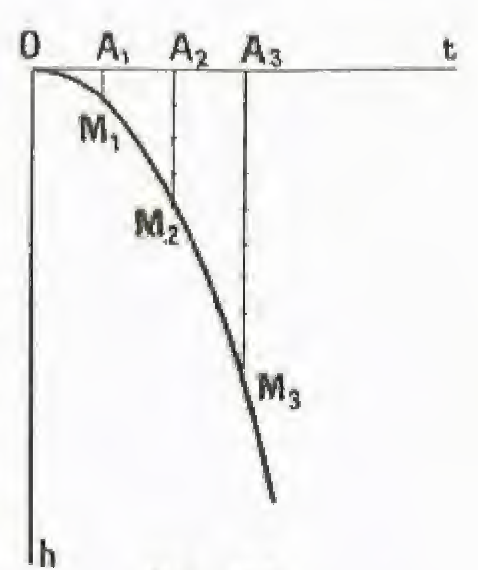


Fig. 27

Finalmente, si se deja caer el bloque de plomo a la vez que el cilindro gira, la punta del lápiz describirá una curva que podrá examinarse después de haber cortado la hoja de papel siguiendo una vertical.

Se observará que si se trazan (*fig.* 27) verticales equidistantes A_1M_1, A_2M_2, ..., sus longitudes miden justamente las alturas de caída durante los tiempos t_1, t_2, ...; siendo t_1 el tiempo durante el cual el cilindro ha girado un arco de longitud OA_1.

La experiencia demuestra que $A_2M_2 = 4A_1M_1$ ó $2^2A_1M_1$; que $A_3M_3 = 9A_1M_1$ ó $3^2A_1M_1$, etc.; así, pues, a los tiempos 1, 2, 3, ..., corresponden alturas de caída 1^2, 2^2, 3^2, ..., de donde se deduce que la relación entre las alturas de caída y los cuadrados de los tiempos es constante, lo que se expresa por la relación

$$(1) \qquad \frac{h}{t^2} = C; \text{ siendo C una constante.}$$

Desgraciadamente, es difícil determinar con precisión el punto de partida O.

Método cronofotográfico. — Este método, más moderno y más preciso, elimina la mayoría de los errores debidos al rozamiento que limitan la precisión de los otros aparatos.

Una esferilla metálica pulimentada, bien iluminada por una fuente luminosa puntual (arco eléctrico), cae verticalmente ante un fondo negro mate. Esta esferilla pulimentada actúa como un espejo convexo de radio pequeño y da una imagen puntual de la fuente luminosa, situada cerca de su centro. Delante de la esferilla se coloca un aparato fotográfico, provisto de una placa sensible y de un obturador consti-

tuido por un disco perforado con orificios equidistantes que gira a velocidad constante (*fig.* 28). Al desarrollar la placa, se observan una serie

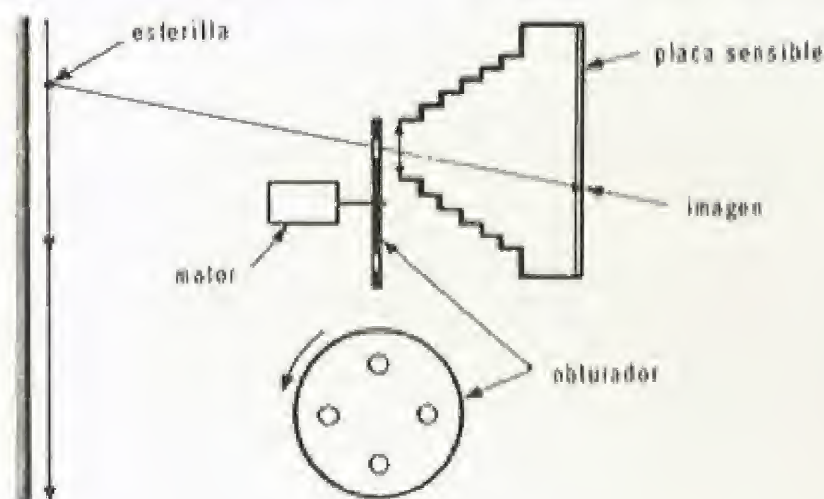


Fig. 28

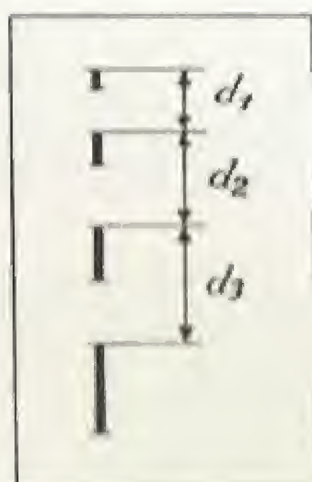


Fig. 29

de imágenes negras: son las fotografías de las posiciones que ha ocupado el centro de la esferilla durante su caída al cabo de intervalos de tiempo iguales. Las imágenes no son puntuales, sino que forman trazos más o menos alargados, ya que la esferilla se desplaza durante la duración de cada fotografía. Hay que partir siempre del mismo extremo de las imágenes para hacer las medidas (*fig.* 29). Cuando se miden las distancias d que separan las imágenes sucesivas, se observa que están en progresión aritmética, es decir, que la velocidad es proporcional al tiempo y que la distancia recorrida desde el momento de partida es proporcional al cuadrado del tiempo.

Este método permite calcular la aceleración de la gravedad g con precisión suficiente, cuando se conoce la relación entre las distancias sobre la placa y las distancias reales en el espacio.

Enunciados de las leyes de caída en el vacío. — LEY DE LOS ESPACIOS. *En caída libre, los espacios recorridos son proporcionales a los cuadrados de los tiempos empleados en recorrerlos.*

De la relación $h = Ct^2$, se deduce que la velocidad (que es la derivada del espacio con respecto al tiempo) es (2): $v = 2Ct$, de donde se deduce la siguiente ley.

LEY DE LAS VELOCIDADES. *En la caída libre, las velocidades son proporcionales a los tiempos de caída.*

LEY DE LA ACELERACIÓN. De la relación (2) se deduce que la aceleración del movimiento es constante e igual a 2C, y que, por consiguiente, la aceleración de la gravedad es constante.

Esta aceleración se denomina g, y las fórmulas que expresan las leyes de la caída de los cuerpos en el vacío se convierten en

$$(1) \quad h = \frac{1}{2} gt^2 \qquad (2) \quad v = gt; \qquad (3) \quad g = \text{constante.}$$

El valor de g puede determinarse aproximadamente por este método; en París, g es sensiblemente igual a 981 centímetros por segundo cada segundo (981 cm/s²).

Métodos indirectos para el estudio de la caída de los cuerpos. — Se han utilizado diferentes métodos indirectos para determinar las leyes de la caída de los cuerpos, que se basan en la observación de que siendo la gravedad una fuerza de magnitud, dirección y sentido constantes, un movimiento de caída no es más que un caso particular del movimiento causado por una fuerza constante en magnitud, dirección y sentido. Utilizando tales fuerzas, pero menores que el peso del cuerpo, el movimiento será de la misma naturaleza, pero lo bastante lento para poder estudiarlo directamente.

Método del plano inclinado de Galileo. — Se denomina "plano inclinado" el plano que forma un ángulo determinado, α, con el plano horizontal (*fig.* 30). Un cuerpo pesado resbala a lo largo de dicho plano; se dice que resbala sin frotamiento cuando la acción del plano sobre el cuerpo es una fuerza perpendicular al plano que no se opone a su desplazamiento sobre el mismo. Experimentalmente, puede utilizarse una plancha lisa, enjabonada. El frotamiento de resbalamiento puede sustituirse por el frotamiento de rodamiento, que es menor, dejando rodar una esferilla ligera por un surco inclinado, pero entonces es necesario hacer una corrección para las medidas precisas, porque la rotación de la esferilla reduce la velocidad del movimiento del centro de gravedad. Se toma con preferencia un carrillo pesado con ruedas ligeras y pequeñas, cuya influencia sobre el movimiento de traslación puede despreciarse. La medida del tiempo de caída puede obtenerse por medio de contactos eléctricos a la salida y a la llegada, o por medio de un diapasón, cuyas oscilaciones se registran sobre una placa ahumada que lleva el carrillo.

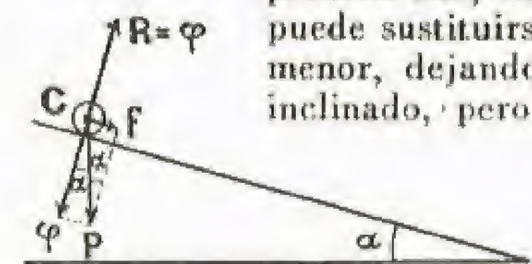


Fig. 30

Para una inclinación bastante pequeña el movimiento es lo suficientemente lento para poder ser observado directamente. El cuerpo móvil, C, está sometido a la reacción R del plano, que es, por hipótesis, perpendicular al plano y a su peso. El peso P puede considerarse descompuesto en dos fuerzas; una, f, paralela a la línea de máxima pendiente del plano, y la otra, φ, normal al plano. La componente φ es neutralizada por la reacción R, puesto que el cuerpo no se hunde en el plano, que se supone lo suficientemente rígido. El cuerpo puede considerarse, por consiguiente, como un móvil sometido a la acción de la única fuerza f. De la figura se desprende que f es igual a P sen α, es decir, menor que P, puesto que el seno de cualquier ángulo es siempre menor que la unidad y tanto más pequeño cuanto menor sea α.

Esta fuerza es, además, de intensidad, dirección y sentido constantes. Para inclinaciones pequeñas, la determinación de los pares de valores correspondientes a los espacios recorridos y a los tiempos empleados en recorrerlos es fácil; se comprueba que estos valores satisfacen una relación de la forma $l = \frac{1}{2} \gamma t^2$, donde γ es una constante, es decir, que el movimiento es uniformemente acelerado.

La aceleración γ depende de la inclinación del plano: se demuestra que es proporcional al seno del ángulo; $\frac{\gamma}{\text{sen } \alpha} = \text{constante.}$

La experiencia no puede realizarse cómodamente más que con ángulos bastante pequeños; si se admite la validez de los resultados para $\alpha = 90°$, se deduce, como hizo Galileo, que el movimiento de caída libre es también uniformemente acelerado; la aceleración en caída libre es, por otra parte, igual al valor común de la relación $\frac{\gamma}{\text{sen } \alpha} = \frac{g}{\text{sen } 90°} = g$.

Noción de masa. — Estas experiencias han conducido a precisar una noción muy importante: la noción de **masa.**

Según lo anterior, entre la aceleración del movimiento y el ángulo de inclinación existe la relación $\gamma = g$ sen α; por otra parte, la fuerza motriz correspondiente es $f =$ P sen α; de estas dos relaciones resultará: $\frac{f}{\gamma} = \frac{P}{g} =$ constante, o sea, m.

Muestra la experiencia que si se cambia el cuerpo deslizante sigue existiendo una relación constante entre las fuerzas que actúan sobre el cuerpo y las aceleraciones que le comunican, pero el valor m de este cociente varía de un cuerpo a otro y, por consiguiente, es una "magnitud característica de cada cuerpo" que se denomina "masa" de dicho cuerpo.

La relación anterior puede escribirse

$$f = m\gamma,$$

que es la "relación fundamental de la dinámica".

Método de la máquina de Atwood. — Las leyes del movimiento de un cuerpo sometido a la acción de una fuerza constante y la relación fundamental $f = m\gamma$ pueden obtenerse también por medio de la máquina de Atwood. Esta máquina se compone esencialmente de una polea muy ligera (*fig.* 31), móvil alrededor de un eje horizontal; por la garganta de esta polea pasa un hilo delgado, en cuyos extremos se han fijado dos pesos iguales, A y A'. Uno de estos pesos, A, se desplaza ante una regla graduada de arriba abajo. Si el hilo es bastante fino, el sistema permanece en equilibrio en cualquier posición.

Una vez elevado el peso A hasta situarlo delante del cero de la regla, se coloca encima de él una pequeña sobrecarga de peso S; el sistema material compuesto por los dos pesos A y A' y por la sobrecarga S se pone en movimiento bajo la acción del peso de la sobrecarga, es decir, bajo la acción de una fuerza de intensidad, dirección y sentido constantes. Si la sobrecarga es ligera, el movimiento es lo suficientemente lento para poder ser bien observado. Los desplazamientos se miden sobre la regla, y los tiempos pueden evaluarse con un cuentasegundos, por ejemplo.

La experiencia consiste, como en el caso del plano inclinado, en determinar un cierto número de pares de valores correspondientes a los espacios recorridos y a los tiempos empleados en recorrerlos.

Se comprueba que los espacios son proporcionales a los cuadrados de los tiempos. La aceleración del movimiento aumenta con la sobrecarga.

Sea M la masa de cada uno de los pesos A y A' y m la de la sobrecarga S: la aceleración del movimiento vendrá expresada por la relación $S = (2M + m)\gamma$. Como $S = mg$, γ es inferior a g, y el movimiento será más lento que la caída libre.

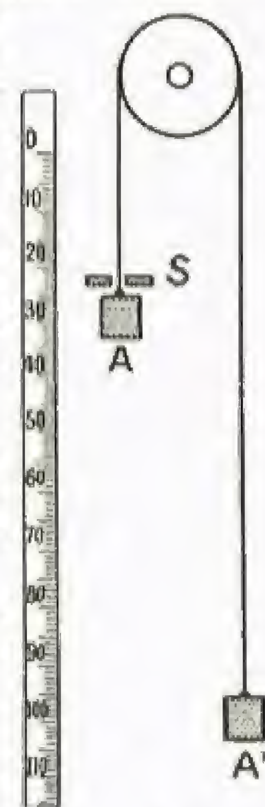


Fig. 31

La máquina de Atwood permite también establecer experimentalmente el principio de inercia: cuando sobre un cuerpo en movimiento no actúa fuerza alguna, su movimiento es rectilíneo y uniforme.

Para esta demostración se utiliza una sobrecarga provista de aletas que sobresalen ligeramente del cuerpo A. La experiencia consiste en detener la sobrecarga, es decir, en suprimir la fuerza motriz, lo que se realiza por medio de un anillo que deja pasar A y que detiene la sobrecarga, y en verificar que el sistema conserva una velocidad constante, puesto que los espacios recorridos se hacen proporcionales al tiempo.

Indiquemos por fin que es sencillo establecer experimentalmente, con la máquina de Atwood, que en un movimiento uniformemente acelerado las velocidades son proporcionales a los tiempos.

Unidad C. G. S. de fuerza. — En el sistema C. G. S. (v. MECÁNICA, pág. 246, vol. V), las unidades fundamentales son el centímetro, el gramo-masa y el segundo. La unidad de fuerza se define de forma que la fórmula $f = m \cdot \gamma$ se verifique sin coeficiente numérico. Según esta fórmula, la unidad de fuerza es la fuerza capaz de comunicar a una masa de un gramo una aceleración de un centímetro por segundo cada segundo; esta unidad se denomina "dina".

Si se aplica al peso, la fórmula $f = m \cdot \gamma$ se convierte en $p = m \cdot \gamma$: el peso de un cuerpo en dinas es igual al producto de su masa en gramos por el valor de la aceleración de la gravedad.

En París, un cuerpo cuya masa es un gramo pesa, aproximadamente, 981 dinas.

Péndulo

Reseña histórica. Movimiento del péndulo. Estudio de las oscilaciones pequeñas. Péndulo simple. Caso de amplitudes más importantes. Fuerzas capaces de producir un movimiento pendular. Aplicación del péndulo a la medida de g. Medida de l. Péndulo reversible de Kater. Medida del periodo de un péndulo. Resultados de las medidas. Variaciones de g en la superficie de la tierra. Causas de las variaciones de g. Demostración del movimiento de rotación de la Tierra por medio del péndulo

Reseña histórica. — El movimiento del péndulo fue estudiado por **Galileo.** En 1583, a la edad de diecinueve años, observó que las oscilaciones de las lámparas de la catedral de Pisa no dependían de su peso, sino de la longitud de sus cadenas de suspensión. Encontró las leyes del péndulo, que utilizó para averiguar la fiebre de los enfermos; para ello, los médicos tomaban el pulso al paciente con una mano y con la otra acortaban o alargaban un pequeño péndulo hasta sincronizar sus oscilaciones con las pulsaciones.

Galileo lo utilizó también para estudiar la caída de los cuerpos, asimilando la oscilación del péndulo a la caída de un cuerpo a lo largo de un arco de circunferencia, y dedujo que la caída de un cuerpo no depende de su peso.

Huygens también estudió el péndulo, que aplicó a la regularización de la marcha de los relojes; descubrió la noción de fuerza centrífuga, y estudió el centro de oscilación de un péndulo, al igual que Mersenne y Descartes, lo que le llevó al teorema de las fuerzas vivas.

Borda determinó, por medio del péndulo, la aceleración debida a la gravedad, como también Biot y Kater.

Los péndulos compensados fueron construidos por **Graham** (1675-1751), inventor del escape (1726), **Leroy** (1686-1759) y **Guillaume** (1861-1938). Por último, la rotación de la tierra fue demostrada por **Foucault** (1819-1868) por medio de un péndulo suspendido desde lo alto de la cúpula del Panteón de París (1861).

Definición. *Se denomina* péndulo *a un sólido indeformable que oscila bajo la acción de su peso alrededor de un eje horizontal que no pasa por su centro de gravedad.* Pueden citarse como ejemplos el eje volante de un reloj o una esferilla metálica suspendida de un hilo fino cuya extremidad superior esté fija. Con frecuencia se denomina tal sólido "péndulo compuesto", por oposición a "péndulo simple", que es un caso particular e ideal del péndulo.

Movimiento del péndulo. — Cuando el péndulo está en equilibrio estable, su centro de gravedad G se encuentra en el plano vertical que pasa por el eje de rotación O, y debajo de éste. Cuando se le aparta de esta posición, G describe un arco de círculo AB, OG gira un ángulo α, y el punto G, por consiguiente, se eleva. Si se abandona a su propio peso, el péndulo gira alrededor de su eje O, y G desciende desde B a A; gracias a la velocidad adquirida, el centro de gravedad no puede detenerse en A y vuelve a ascender hasta B', donde se detiene, descendiendo nuevamente, y así sucesivamente. Si los rozamientos que se oponen al movimiento son despreciables, B y B' son simétricos con respecto a OA.

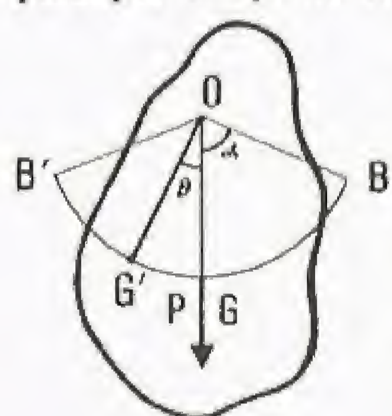


Fig. 32

Se denomina "oscilación" el movimiento completo ABAB'A; amplitud de la oscilación es el ángulo máximo θ que forma OG con la vertical OA; la elongación en un instante dado es el ángulo θ que forma en ese momento OG con la vertical (*fig.* 32).

La posición del péndulo queda perfectamente definida por el valor de la elongación, puesto que, como se comprueba fácilmente, las oscilaciones son planas. Para evitar toda ambigüedad, es conveniente contar positivamente las elongaciones situadas a un lado de la vertical, por ejemplo a la derecha del observador situado frente al péndulo, y negativamente a las elongaciones opuestas. También puede definirse la posición del péndulo por el arco s que corresponde a la elongación, afectando a los arcos AG' un signo que se corresponda con el de las elongaciones angulares.

Las dos magnitudes, s y θ, están ligadas por la relación $s = l\theta$; θ se expresa en radianes. Para conocer el movimiento del péndulo basta con determinar la variación de la elongación con el tiempo, es decir, la relación $\theta = f(t)$.

Esta relación es particularmente sencilla cuando la elongación es del orden de algunos grados; el arco descrito por el péndulo no llega a alcanzar la décima parte de la longitud l del péndulo; se dice entonces que las oscilaciones son pequeñas.

Estudio de las oscilaciones pequeñas. — Como el movimiento del péndulo es demasiado rápido para que se puedan hacer directamente medidas de tiempos y de elongaciones, se utiliza un método de inscripción gráfica. Se fija debajo del péndulo un estilete que frote ligeramente una hoja recubierta de negro de humo; esta hoja está arrollada a un cilindro que gira uniformemente, accionado por un mecanismo de relojería, alrededor de un eje horizontal situado en el plano de oscilación del péndulo (*fig.* 33).

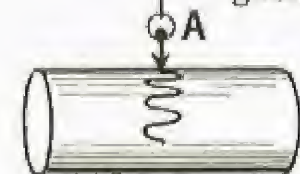


Fig. 33

En estas condiciones, se obtiene una curva cuyas abscisas, tomadas paralelamente al eje del cilindro, son iguales a las elongaciones del péndulo y cuyas ordenadas, tomadas a lo largo del eje perpendicular, son proporcionales al tiempo.

La experiencia demuestra que estas curvas son sinusoidales, es decir, que entre la elongación s y el tiempo t se tiene la relación (1) $s = s_0 \cdot \operatorname{sen} (\omega t + \beta)$; relación en la que s_0 representa el valor máximo del arco s; ω y β son dos constantes.

El valor de β depende del instante que se tome como origen de tiempos; si se cuenta el tiempo a partir del momento en que el péndulo pasa por su posición de equilibrio, $s = 0$ para $t = 0$, β es nulo. Si se toma como origen de tiempos el instante en que el péndulo tiene su elongación máxima, es decir, el instante, por ejemplo, en que abandona el péndulo, $s = s_0$ para $t = 0$; lo que exige que sen $\beta = 1$, es decir, $\beta = \frac{\pi}{2}$: la relación (1) puede escribirse entonces (2) $s = s_0 \cos \omega t$; finalmente, con mayor generalidad, si para $t = 0$ la elongación tiene un valor s_1, el valor de β está determinado por la ecuación $s_1 = s_0 \cdot \operatorname{sen} \beta$.

La constante ω tiene también una significación física; en efecto, un seno o un coseno son funciones del tiempo que, como sus derivadas, reproducen los mismos valores cuando $\omega t + \beta$ aumenta 2π, es decir, cuando el tiempo aumenta $2\frac{\pi}{\omega}$; el péndulo vuelve a pasar por las mismas posiciones y con la misma velocidad, a intervalos regulares de tiempos iguales a (3) $T = 2\frac{\pi}{\omega}$; este intervalo de tiempo se denomina "período" del péndulo.

La velocidad del péndulo en cualquier instante t se obtiene hallando la derivada de s; si, en particular, se ha tomado como origen de tiempos el instante en que se suelta el péndulo, se tendrá $s = s_0 \cdot \cos \omega t$, y $v = -\omega \cdot s_0 \cdot \operatorname{sen} \omega t$.

De la relación $T = 2\pi/\omega$, se obtiene $\omega = \frac{2\pi}{T}$; ecuaciones del movimiento son entonces $s = s_0 \cdot \cos 2\pi \frac{t}{T}$, y $v = -\frac{2\pi}{T} s_0 \cdot \operatorname{sen} 2\pi \frac{t}{T}$.

Leyes del péndulo. El estudio experimental del péndulo pesado, que veremos a propósito del péndulo simple, muestra que en el caso de las oscilaciones de poca amplitud, y con una aproximación tanto mayor cuanto menor sea dicha amplitud:

1º El movimiento del péndulo pesado es sinusoidal;

2º El período T_0 es independiente de la amplitud;

3º El período viene dado por la fórmula

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{I}{Mga}},$$

en la cual I representa el momento de inercia del cuerpo sólido con respecto al eje, M la masa del péndulo y a la distancia del centro de gravedad al eje.

Para calcular el momento de inercia conviene recordar el siguiente teorema:

El momento de inercia con respecto a un eje XX' *es igual a la suma del momento de inercia con respecto a un eje paralelo que pasa por el centro de gravedad y al producto de la masa del péndulo por el cuadrado de la distancia entre los dos ejes.*

Se demuestra, por ejemplo, que el momento de inercia de una esfera de radio r, con respecto a un eje que pasa por su centro, es

$$I_G = \frac{2}{5} Mr^2.$$

Si la esfera está suspendida por un hilo de longitud l a un punto fijo O, su momento de inercia con respecto a un eje que pasa por O es $I_0 = I_G + M(l + r)^2$; el sistema así constituido es un péndulo compuesto cuyo período está dado por la fórmula

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{Mga}}, \text{ con } I = I_0 \quad y\ a = l + r.$$

Péndulo simple. — Examinemos el caso de una masa esférica de radio r, suspendida a un hilo ligero de longitud l. Cuando r es despreciable con respecto a l, y, por consiguiente, puede considerarse la esfera como un punto material, tendremos el caso ideal del péndulo simple, cuyo período se convierte en

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Un péndulo simple es un punto pesante A suspendido de un punto fijo O por un hilo inextensible, rígido y sin peso.

No puede conseguirse rigurosamente el péndulo simple. Una buena aproximación se obtiene por medio de un cuerpo pesante de pequeñas dimensiones suspendido de un hilo fino (*fig.* 34).

Fig. 34

Veremos a continuación el estudio experimental que justifica la fórmula que da el período de péndulo simple.

Variaciones del período con la amplitud.

La experiencia consiste en medir el período de un mismo péndulo, en un mismo lugar, para diferentes amplitudes. Se representa la curva de las variaciones de T en función de α (*fig.* 35). En esta curva se observa que el período es en conjunto una función creciente de la amplitud; por consiguiente, el período de un péndulo aumenta con la amplitud. Se ve, no obstante, que la curva admite una tangente horizontal para $\alpha = 0$, es decir, que el período varía muy poco cuando la amplitud no es mayor de algunos grados; este resultado notable se conoce por "ley del isocronismo de las pequeñas oscilaciones" y su enunciado es:

Fig. 35

Las oscilaciones pequeñas de un péndulo simple son isócronas. En virtud de lo anterior, se observa que esta ley no es rigurosa, siendo tanto más aproximada cuanto menor sea la amplitud.

Variaciones del período con la masa del péndulo.

Utilizando péndulos de la misma longitud y de diferentes masas en un mismo lugar se demuestra fácilmente que

El período de un péndulo simple es independiente de su masa.

Utilizando péndulos de igual longitud y masa en un mismo lugar, pero de naturaleza diferente, se demuestra que

El período de un péndulo simple es independiente de su naturaleza.

Variaciones del período con la longitud del péndulo.

Si se miden los períodos de un mismo péndulo simple, haciendo que varíe solamente su longitud, se comprueba que cuando la longitud se hace 4, 9, 16, ... veces mayor, el período se hace 2, 3, 4, ... veces mayor, lo que se expresa diciendo que

El período de un péndulo simple es proporcional a la raíz cuadrada de su longitud.

Variación del período con la aceleración de la gravedad.

Un reloj que se ha puesto en hora en un lugar determinado, se adelanta o se retrasa si se le transporta a otro punto de la tierra. Estas variaciones se atribuyen a las variaciones de la aceleración de la gravedad; el estudio matemático indica que el período varía en razón inversa de la raíz cuadrada de g.

Este resultado puede confirmarse experimentalmente utilizando un péndulo de hierro, y añadiendo o restando al peso del péndulo una fuerza vertical debida a la acción de un imán.

Caso de amplitudes más importantes. — Cuando la amplitud excede de algunos grados es necesario añadir un término de corrección para el cálculo del período. Hasta amplitudes de 30°, aproximadamente, puede utilizarse la fórmula

$$T = T_0 \left[1 + \frac{\alpha^2}{16} \right],$$

en donde T es el período real, T_0 el período del péndulo para las pequeñas oscilaciones y α el valor de la amplitud expresada en radianes.

Fuerzas capaces de producir un movimiento pendular. — Se denomina, en general, movimiento pendular, a todo movimiento de rotación alrededor de un eje en el cual el parámetro angular que fija la posición del cuerpo móvil es una función sinusoidal del tiempo.

Se obtienen tales movimientos siempre que el momento resultante con respecto al eje de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo sólido es proporcional al ángulo de desviación con respecto a la posición de equilibrio; en el caso del péndulo compuesto, las fuerzas que actúan son: el enlace con el eje, cuyo momento, con respecto al eje, es nulo, y el peso del cuerpo, cuyo momento con respecto al eje es $M \cdot g \cdot a \cdot \operatorname{sen} \theta$, que para oscilaciones de pequeña amplitud difiere poco de $M \cdot g \cdot a \cdot \theta$.

Aplicación del péndulo a la medida de g. — El péndulo se ha utilizado para determinar la aceleración de la gravedad. Si fuese posible realizar un péndulo simple, el principio de medida sería el siguiente:

de la fórmula $T = 2\pi \sqrt{\dfrac{l}{g}}$, se obtiene $g = 4\pi^2 \dfrac{l}{T^2}$, lo que permite calcular g si se miden la longitud l y el período T. Por este método pueden obtenerse medidas de g bastante aproximadas, utilizando péndulos que se aproximen a un péndulo simple; el péndulo de Borda, por ejemplo, estaba compuesto por una esfera de platino de 4 cm de diámetro que pendía de un alambre muy fino, de 4 m aproximadamente.

Teniendo en cuenta que el error relativo de un producto o de un cociente es igual a la suma de los errores relativos de cada término, el error relativo cometido al calcular g es igual, en virtud de la fórmula precedente, a la suma del error relativo cometido al medir l y al doble del error relativo con respecto a T. Por consiguiente, para obtener medidas precisas de g, será necesario conocer l y T con gran precisión.

Medida de l. Péndulo reversible de Kater. — Para medir l con precisión se utiliza el método del *péndulo reversible de Kater*, método fundado en el siguiente teorema de Huygens: "Si las oscilaciones sucesivas de un péndulo compuesto alrededor de dos ejes paralelos cuyo plano contiene el centro de gravedad y situados a distancias desiguales de dicho centro son iguales, la distancia entre los dos ejes es igual a la longitud del péndulo simple cuya duración de oscilación fuera la misma" (péndulo simple síncrono).

La determinación de los dos ejes alrededor de los cuales las duraciones de oscilación fueran las mismas es delicada para un péndulo de forma determinada; el péndulo de Kater es un péndulo "deformable", cuya forma se modifica por tanteos hasta que la duración de las oscilaciones alrededor de las aristas de dos cuchillos paralelos sean iguales. La longitud del péndulo simple síncrono será entonces, en virtud del teorema de Huygens, igual a la distancia de las dos aristas, distancia que puede escogerse por construcción y determinada exactamente.

La figura 36 es un modelo de péndulo de Kater; los dos cuchillos C, C′ están fijos en la barra AB, y la masa L del péndulo se escoge de forma que el centro de gravedad se encuentre situado entre las dos aristas. El péndulo se deforma desplazando la masa adicional M a lo largo de la barra, sobre la cual puede fijarse mediante el tornillo de presión V. El ajuste se precisa mediante una masa más pequeña N, ligada a M por un tornillo v.

Una vez determinada la longitud del péndulo simple síncrono del péndulo de Kater, basta medir exactamente el período para obtener g con precisión.

Fig. 36

Medida del período de un péndulo. — Esta medida sólo presenta dificultades en los casos en que hay que obtenerla con gran precisión. Se han utilizado varios métodos, de los que se indicará solamente el principio.

Método de los pasos. Supongamos que un cronómetro de precisión puede ponerse en marcha en el instante preciso en que el péndulo pasa, al oscilar, por su posición de equilibrio, y que puede pararse el cronómetro exactamente en el instante en que el péndulo vuelve a pasar por esta posición al cabo de una oscilación completa; el tiempo medido sería exactamente igual al período del péndulo.

Pero, en realidad, se comete un error inevitable en el instante en que el cronómetro se pone en movimiento, y también en el momento en que se le para. Conviene, pues, distribuir estos errores entre un gran número de oscilaciones: si se mide, por ejemplo, la duración t de mil oscilaciones con un error posible sobre esta medida de dos décimas de segundo (una décima en el momento de la puesta en marcha y una décima en el momento de la parada), el período del péndulo será $T = t/\ 1\,000$, con una aproximación de dos diezmilésimas de segundo.

Para evitar la fatiga inherente a la enumeración de un gran número de oscilaciones, pueden registrarse eléctricamente los pasos del péndulo; no obstante, el número de pasos que pueden emplearse está limitado por el amortiguamiento de la amplitud de las oscilaciones debidas al frotamiento del aire.

Método de las coincidencias. En este método, imaginado por Borda, se compara el péndulo que hay que estudiar con el volante de un reloj astronómico ajustado.

Ya se ha indicado que, cuando un reloj está ajustado, la duración de la oscilación de su volante es igual al avance de tiempo que indican las agujas en el cuadrante a cada oscilación; por consiguiente, la duración se conoce exactamente.

El método sólo se aplica cuando el período del péndulo que se estudia, T_p, varía poco del período del volante del reloj, T_b; esto puede conseguirse con un péndulo de Kater, escogiendo convenientemente, por construcción, la distancia entre los cuchillos.

Situados frente a frente el péndulo y el volante, se dice que hay coincidencia cuando pasan por su posición de equilibrio en el mismo instante y desplazándose en el mismo sentido. Esta coincidencia puede juzgarse por diferentes medios; por ejemplo, utilizando un anteojo por el que se observan dos trazos finos verticales grabados sobre cada péndulo, cuyas imágenes deben coincidir cuando los péndulos están en reposo.

Supongamos que el período de uno de los péndulos sea algo menor que el del otro, por ejemplo, $T_p < T_b$; el péndulo oscilará algo más de prisa que el volante y se observará a través del anteojo cómo oscila con un adelanto que aumenta a cada oscilación.

Se observará una nueva coincidencia cuando el péndulo haya efectuado una oscilación más que el volante.

Si n es el número de oscilaciones del volante efectuadas durante el intervalo de tiempo t (medido en el cuadrante del reloj), transcurrido entre ambas coincidencias, se tendrá $t = n\ T_b$, relación que permite obtener n, puesto que t y T_b son conocidos.

Para determinar T_p, basta observar que el péndulo ha efectuado durante el tiempo t una oscilación más que el volante, o sea $n + 1$; por consiguiente, se tendrá la relación $(n + 1)\ T_p = n \cdot T_b$, de donde

se obtiene $T_p = \dfrac{n}{n + 1} \cdot T_b$.

En las medidas de alta precisión hay que hacer determinadas correcciones: corrección de amplitud, que no puede ser infinitamente pequeña; corrección de curvatura de las aristas de los cuchillos; correcciones debidas a la influencia del aire, que por la presión que ejerce sobre el péndulo disminuye un peso equivalente al empuje de Arquímedes que sufre en el seno del aire; la debida a la masa de aire arrastrada en el movimiento y, por último, la corrección de viscosidad.

Resultados de las medidas. Variaciones de g en la superficie de la Tierra. — Estos métodos han permitido determinar g con una precisión que alcanza la millonésima, y ponen en evidencia las variaciones de g en la superficie de la Tierra.

Pueden distinguirse variaciones sistemáticas y variaciones accidentales: de una manera general, g aumenta en función de la latitud y disminuye cuando aumenta la altura; a estas variaciones sistemáticas se sobreponen variaciones locales accidentales.

He aquí algunos resultados:

Ecuador, al nivel del mar ... ... g =	978,030 C. G. S.
Latitud de 45º al nivel del mar	980,616
Observatorio de París (suelo)	980,943
Polo	983,216

Obsérvese que desde el Ecuador al Polo, g aumenta aproximadamente la 1/200ª de su valor; el peso de un cuerpo varía en las mismas proporciones; como la relación fundamental de la dinámica $f = m \cdot \gamma$ da, en el caso de la gravedad, $p = m \cdot g$ (estando el peso expresado en dinas, la masa en gramos y g en centímetros/segundo por segundo), se ve, por ejemplo, que el gramo-peso de París vale 980,943 dinas, mientras que el gramo-peso del Ecuador sólo vale 978,030 dinas.

Causas de las variaciones de g. — Las variaciones de g pueden explicarse teniendo en cuenta que la gravedad no es más que un caso particular de la atracción universal.

Como se sabe, ciertos fenómenos astronómicos, principalmente el movimiento de los planetas alrededor del Sol, se rigen por la siguiente ley:

LEY DE ATRACCIÓN UNIVERSAL. *Dos masas cualesquiera se atraen con una fuerza directamente proporcional a su producto e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.*

$$f = k\frac{m \cdot m'}{d^2}.$$

La constante k, denominada constante de gravitación o constante de Newton, ha podido determinarse por experiencias directas, obteniéndose el valor: $k = 6{,}7 \cdot 10^{-8}$ C.G.S.

Se demuestra que en el caso de una esfera puede considerarse toda su masa concentrada en el centro.

Si R es el radio de la Tierra, m' su masa y h la altura de un cuerpo de masa m, la fuerza de atracción de la Tierra sobre esta masa, igual a su peso, será

$$f = k\frac{m\,m'}{(R+h)^2} = mg,$$

de donde se obtiene $g = k\dfrac{m'}{(R+h)^2}$, fórmula que explica la disminución de g al aumentar la altura.

Si g_0 es el valor de g al nivel del mar, se tendrá $g_0 = k\dfrac{m'}{R^2}$;

$$g = g_0\frac{R^2}{(R+h)^2} = g_0\frac{1}{\left(1+\dfrac{h}{R}\right)^2}.$$

Como $\dfrac{h}{R}$ tiene un valor muy pequeño con respecto a 1, podrá escribirse para las alturas terrestres

$$g = g_0\left(1 - \frac{2h}{R}\right).$$

Dado el achatamiento de la Tierra en los polos, la atracción y, por consiguiente, g, deben disminuir cuando se va del polo hacia el ecuador, a lo que habrá que añadir la acción de la fuerza centrífuga debida a la rotación de la Tierra alrededor del eje que pasa por sus polos.

La fuerza centrífuga que actúa sobre un cuerpo de masa m es $m\,\omega^2 r$, siendo ω la velocidad angular de rotación de la Tierra y r el radio del paralelo terrestre que pasa por el cuerpo (ω se expresa en radianes por segundo).

Designando la latitud del cuerpo por λ, se tendrá $r = R\cos\lambda$, de donde resulta que la fuerza centrífuga, que es nula en el polo, será máxima en el ecuador (*fig.* 37). La variación de g con la latitud se representa con bastante aproximación por la fórmula

$$g = g_{45}\,(1 - 0{,}00259\cos 2\lambda).$$

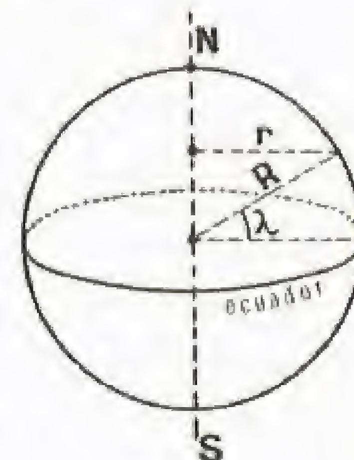


Fig. 37

Demostración del movimiento de rotación de la Tierra por medio del péndulo. — Al estudiar el movimiento del péndulo, vimos que no actuaba sobre él fuerza alguna que lo desplazara del plano vertical correspondiente a su posición inicial, es decir, que las oscilaciones las efectuaba siempre en un mismo plano denominado plano de oscilación, aunque se haga girar la armadura del péndulo. Foucault utilizó esta propiedad para demostrar el movimiento de rotación de la Tierra. El péndulo de Foucault, constituido por una esfera que pendía de un hilo de acero fijado en la cúpula del Panteón de París, llevaba unido a la parte inferior de la esfera un estilete que marcaba su trazo sobre un plano horizontal cubierto de arena fina situado debajo de él. Se observó que dicho trazo iba girando progresivamente, conforme oscilaba el péndulo, de forma que en París daba una vuelta completa al cabo de 32 horas. Esta experiencia se interpretó admitiendo que es el suelo el que gira bajo el péndulo, poniéndose así de manifiesto el movimiento de rotación de la Tierra.

Masa específica y peso específico. Densidades

Densidad relativa. — **Determinación de las densidades relativas:** Caso de los líquidos. Caso de los sólidos. Cuerpos solubles. Método hidrostático. Caso de los gases. — **Determinación de las masas específicas:** Caso de los sólidos y de los líquidos. Caso del agua. Caso del aire. Caso de los gases

DEFINICIONES. La experiencia muestra que, a igualdad de volumen, las masas y, por consiguiente, en un mismo lugar, también los pesos de cuerpos diferentes, son a veces muy diferentes; un metro cúbico de bronce, por ejemplo, tiene una masa muy superior a la de un metro cúbico de madera.

Para poner de manifiesto estas diferencias se ha determinado para cada cuerpo la masa de la unidad de volumen, que se denomina *masa específica*; análogamente, el *peso específico* de un cuerpo se define como el peso de la unidad de volumen de dicho cuerpo. La definición precedente supone implícitamente que la substancia es homogénea, es decir, que todos los elementos de volumen de la substancia son idénticos; en este caso, la masa de un volumen v de un cuerpo de masa específica μ, es $m = v\mu$; análogamente, el peso será $p = v\omega$, siendo ω el peso específico.

Al indicar el valor numérico de una masa o de un peso específicos es necesario precisar, a la vez, la unidad de masa (o de peso) y la unidad de volumen; en el sistema C.G.S. las masas específicas se expresan en g/cm^3, y los pesos específicos en dinas por cm^3; en el sistema M.T.S., en toneladas/m^3 y en estenios/m^3; a veces también se expresan los pesos específicos en gramos-peso/cm^3.

Densidad relativa. — La necesidad de precisar las unidades de masa y de volumen en la expresión de una masa específica es un inconveniente, ya que no se adoptan universalmente las mismas unidades; los países de lengua inglesa, principalmente, tienen unidades particulares, y para evitar esta dificultad se ha introducido la noción de "densidad relativa".

Se llama "densidad relativa" de un cuerpo A con respecto a otro cuerpo B, que se toma como término de comparación, a la relación entre las masas de volúmenes iguales del cuerpo A y del cuerpo B; los cuerpos se miden en las mismas condiciones de temperatura y de presión, condiciones de las cuales depende la densidad.

En virtud de un acuerdo internacional, se ha escogido como cuerpo de comparación el agua destilada para los sólidos y los líquidos, y el aire seco, desprovisto de gas carbónico, para los gases.

OBSERVACIÓN. Sea v el volumen de un cuerpo, sólido o líquido, y m su masa; según la definición anterior, la masa específica de este cuerpo es $\mu = \dfrac{m}{v}$; teniendo en cuenta que un centímetro cúbico de agua destilada a 4º tiene sensiblemente una masa de 1 g, el número v que mide el volumen del cuerpo en centímetros cúbicos mide también la masa en gramos de un mismo volumen de agua pura a 4º; el cociente $\dfrac{m}{v}$, que representa la masa específica, representa también, con mucha aproximación, la densidad relativa del cuerpo con respecto al agua a 4º; por esta razón, las masas específicas de los cuerpos sólidos o líquidos se denominan algunas veces "densidades absolutas" o, simplemente, densidades.

La confusión entre la masa específica y la densidad relativa, que reviste poca importancia en el caso de sólidos o de líquidos, conduciría a graves errores en el caso de los gases, porque la masa de un centímetro cúbico de aire es muy diferente de un gramo.

En el caso de los sólidos o de los líquidos, la masa de un volumen v, dada exactamente por la fórmula $m = \mu v$, puede obtenerse también aproximadamente, por la relación $m = v \cdot d$ (d, densidad relativa); en el caso de los gases se tendrá $\dfrac{m}{m'} = d$ (m', masa del aire que ocupa el mismo volumen que el gas); además, $m' = v \cdot a$ (a, masa específica del aire en las mismas condiciones de temperatura y de presión que el gas), de donde se obtiene: $m = v \cdot a \cdot d$.

Determinación de las densidades relativas

Caso de los líquidos. — Se utiliza una "probeta de densidad", recipiente que se prolonga por un tubo de sección pequeña con un trazo indicador r (*fig.* 38). La experiencia consiste en medir las masas m y

m' del líquido que hay que estudiar y de agua que ocupan el volumen del depósito y del tubo hasta el trazo indicador. Para obtener medidas precisas de las masas, debe operarse por el método de doble pesada y de carga constante; en estas condiciones, el modo operatorio es el siguiente:



Fig. 38

1° Se colocan la probeta vacía y una masa que se toma como muestra M en uno de los platillos de la balanza, y se determina la tara (probeta + M → tara);

2° Se llena la probeta de líquido hasta el trazo indicador r; para equilibrarlo con la tara, deberá restarse de M una masa m, que representa la masa del líquido. Se tendrá la equivalencia: (probeta + líquido + M — m → tara);

3° La probeta, lavada con agua destilada, se llena hasta el trazo indicador; para volver a obtener el equilibrio hay que colocar a su lado una masa M — m'; m' representa la masa de agua (probeta + agua + M — m' → tara); la densidad relativa del líquido en las condiciones de temperatura de la experiencia es $d = \frac{m}{m'}$.

Caso de los sólidos. — La probeta de densidad debe permitir la introducción de la muestra del sólido que se estudia; presenta un orificio al que se empalma el tubo (*fig.* 39); el modo operatorio es el siguiente:

1° Sobre uno de los platillos se coloca la probeta con agua destilada hasta el trazo indicador r, y a su lado la muestra y una masa marcada M, estableciéndose el equilibrio por medio de una tara (probeta + agua + cuerpo + M → tara);

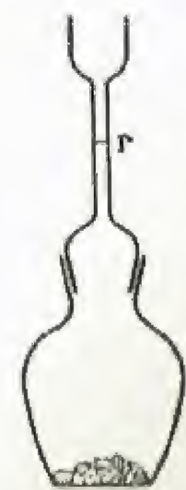


Fig. 39

2° Se quita el cuerpo para restablecer el equilibrio; habrá que reemplazarlo por una masa marcada m (probeta + agua + M + m → tara), que representa la masa de la muestra;

3° Se introduce el cuerpo en la probeta, que se llena de agua hasta el trazo indicador; para restablecer el equilibrio con la tara, habrá que añadir a la masa M una masa m' que representa la masa de agua del mismo volumen que el cuerpo; la densidad relativa, a la temperatura de la experiencia, es $d = \frac{m}{m'}$.

Cuerpos solubles. — El método no se aplica a los cuerpos solubles en el agua, por ejemplo, el azúcar; en este caso, se determina la densidad del cuerpo con respecto a un líquido en el que no es soluble, por ejemplo, el alcohol, y la densidad de este líquido con respecto al agua; se observa fácilmente, teniendo en cuenta las definiciones, que la densidad del cuerpo con respecto al agua es igual al producto de su densidad con respecto al líquido intermediario por la densidad de este líquido con respecto al agua.

Método hidrostático. — En virtud del principio de Arquímedes (v. HIDROSTÁTICA, pág. 21), *todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical hacia arriba equivalente al peso del volumen de fluido desalojado*, es decir, al peso de un volumen de fluido igual al volumen del cuerpo. Esto permite medir la densidad de los cuerpos.

a) *Sólidos.* Se pesa el cuerpo en el aire: sea P su peso; después se sumerge en el agua, y sea P′ su peso aparente. El empuje que experimenta el cuerpo por parte del agua es P — P′; como es equivalente al peso del volumen de agua desalojada, se tendrá:

$$d = \frac{P}{P - P'}.$$

b) *Líquidos.* Se pesa un cuerpo en el aire, después sumergido en el agua, y finalmente sumergido en el líquido que hay que estudiar. Sean P, P′ y P″ los pesos encontrados. El empuje del agua es P — P′ y el del líquido P — P″. Estos empujes son iguales, respectivamente, al peso de un mismo volumen de agua y de líquido. Por consiguiente,

$$d = \frac{P - P''}{P - P'}.$$

Para estas pesadas, el cuerpo se suspende bajo el platillo de una balanza, de forma que pueda sumergirse cómodamente en los líquidos.

Caso de los gases. — Se utiliza un matraz de unos cuantos litros de volumen, en el que se hace un vacío lo más perfecto posible, colocándosele sobre el platillo de una balanza con una masa marcada M y equilibrándosele con una tara; el matraz se coloca después en hielo fundido, y se le pone en comunicación con un depósito que contiene el gas que hay que estudiar. Se llena con el gas sometido a una presión determinada; se cierra el grifo, se limpia el matraz y se le vuelve a poner sobre el platillo de la balanza; la masa m, que hay que restar de M para restablecer el equilibrio, representa la masa de gas introducida; se vacía el globo y se le llena en el hielo fundido y bajo la misma presión de aire seco, cuya masa m' se determina de la misma forma que anteriormente; el cociente $\frac{m}{m'}$ representa la densidad del gas a 0° bajo la presión de llenado.

Conviene recordar que, en virtud de la ley de Avogadro-Ampère, la masa molecular M de un gas es proporcional a su densidad, de acuerdo con la relación M = 29 d, que permite obtener un valor aproximado de la densidad cuando se conoce la masa molecular, o recíprocamente.

Modificando la temperatura y la presión de llenado del globo, se determina la densidad del gas en las diferentes condiciones de temperatura y de presión; si el gas sigue las mismas leyes de dilatación y de compresibilidad que el aire, es decir, si se conduce sensiblemente como un gas perfecto, la densidad respecto al aire es independiente de la temperatura y de la presión.

Determinación de las masas específicas

La determinación de las masas específicas es experimentalmente más difícil que la de las densidades, porque exige, además de la determinación de la masa de la muestra, la de su volumen, mucho más delicada.

Para un sólido de forma geométrica sencilla, las medidas de longitud pueden proporcionar su volumen. Para los demás sólidos, un valor aproximado podrá obtenerse mediante inmersión en una probeta graduada llena de agua. El aumento del volumen total es igual al volumen del cuerpo.

Caso de los sólidos y de los líquidos. — La determinación de las masas específicas de sólidos y líquidos se reduce a la de su densidad con respecto al agua, utilizando la fórmula: μ (cuerpos) = $d \times \mu_{agua}$. Si, por otra parte, se ha determinado la masa específica a 0° y el coeficiente de dilatación cúbica del cuerpo, es fácil calcular su masa específica a $t°$.

Sea, en efecto, m la masa de una muestra, μ_0 y v_0 su masa específica y su volumen a 0°, μt y vt su masa específica y su volumen a $t°$: se tendrá: $m = v_0\ \mu_0 = vt\ \mu t$.

De donde $v_0\ \mu_0 = vt\mu t$; por otra parte, $vt = v_0\ (1 + kt)$, siendo k el coeficiente de dilatación cúbica de la muestra, de donde $\mu t = \frac{\mu_0}{1 + kt}$; las masas específicas varían en razón inversa del binomio de dilatación. Este mismo razonamiento se aplica al gas cuya masa específica a volumen constante o a presión constante, varía en razón inversa del binomio de dilatación $(1 + \alpha t)$, siendo $\alpha = 1/273$.

Caso del agua. — Para obtener la masa específica de los sólidos y de los líquidos es necesario conocer la del agua. El método más preciso es un método hidrostático.

DENSIDAD DE LOS PRINCIPALES CUERPOS

Cuerpos simples, sólidos y líquidos

Aluminio	2,70	Manganeso	7,20
Antimonio	6,70	Mercurio	13,595
Arsénico cristalizado	5,73	Molibdeno	10,28
— negro	4,70	Níquel	8,90
Azufre natural	2,07	Oro (después de la fusión)	19,30
— monoclínico	1,96		
Bario	3,50	Oro (comprimido despues de destilación)	19,27
Bismuto	9,80		
Boro	3,187		
Bromo	2,30	Paladio	11,90
Cadmio	8,65	Plata (comprimida después de la fusión)	10,50
Calcio	1,55		
Carbono, grafito	2,24		
— , diamante	3,47 a 3,56	Platino forjado (después de la fusión)	21,46
Cinc	7,14	Plomo	11,34
Cromo	7,10	Potasio	0,86
Cobalto	8,90	Rodio (después de la fusión)	12,10
Cobre	8,94		
Estaño blanco	7,30	Rubidio	1,53
— gris	5,85	Selenio amorfo	4,80
Estroncio	2,60	— vítreo	4,20
Fósforo blanco	1,83	Silicio cristalizado	2,40
— rojo	2,34	Tántalo	16,60
Hierro electrolítico	7,90	Titanio	4,50
Iridio	22,40	Tungsteno	19,30
Litio	0,53	Uranio	18,70
Magnesio	1,74	Yodo	4,94

Minerales

Antracita	1,26 a 1,81	Lignitos	1,10 a 1,35
Betún	1,00 a 1,40	Micas	2,71 a 3,20
Hulla	1,20 a 1,50	Sal gema	2,13 a 2,17
Talco	2,75		

Piedras preciosas

Ágata	2,55 a 2,63	Ópalo	1,90 a 2,30
Amatista	4,00	Rubí	3,95 a 4,10
Ámbar	1,034	Topacio	3,40 a 3,65
Esmeralda	2,63 a 2,91	Turmalina	2,90 a 3,20
Jade	2,96 a 3,06	Turquesa	2,60 a 2,68

Cuerpos gaseosos

(Densidad con respecto al aire, a 76 cm de mercurio de presión y a 0°C, salvo indicación contraria)

Acetileno	0,9056	Hidrógeno	0,06948
Agua (a 100°)	0,6298	Metano	0,5544
Amoníaco	0,5962	Nitrógeno	0,9672
Carbónico (anhídrido)	1,5288	Nitroso (óxido)	1,5301
		Nítrido (óxido)	1,0366
Clorhídrico (gas)	1,2681	Oxígeno	1,1053
Cloro	2,491	Sulfuroso (anhídrido)	2,2639
Éter (a 100°)	2,586		

Diversos

Abeto	0,50 a 0,70	Mármol	2,30
Encina	0,60 a 1,20	Vidrio	2,50

Para esta determinación se utiliza un cubo de cuarzo perfectamente tallado, cuya arista l se mide con una gran precisión, y se determina el empuje que sufre este cubo cuando se ha sumergido en agua pura a una temperatura bien determinada. Sea P este empuje; el volumen del cubo es l^3 y el peso específico del agua será

$$\omega = \frac{P}{l^3}.$$

Este método, en el que intervienen solamente medidas de longitud y pesadas, es muy preciso; según su definición teórica, el kilogramo es la masa de un decímetro cúbico de agua destilada a 4°; el kilogramo patrón, tal como se ha realizado, es muy poco diferente, de forma que la masa específica del agua destilada a 4° es sensiblemente igual a la unidad; exactamente 1,000073 kg/dm³.

Conociendo la masa específica de un cuerpo a una temperatura $t°$, es fácil determinar su masa específica a otra temperatura $t'°$; basta con determinar la densidad del cuerpo de temperatura $t'°$ tomando como cuerpo de comparación el propio cuerpo $t°$; esta densidad d es, en efecto, por definición, igual al cociente de las masas de un mismo volumen v tomado a $t'°$ y a $t°$, $d = \dfrac{v \cdot \mu t'}{v \cdot \mu t}$, de donde $\mu' t = d \cdot \mu t$.

El cuadro siguiente, que indica las densidades relativas del agua a diferentes temperaturas con respecto al agua a 4°, permite calcular, por medio de la relación $\mu_t = d \cdot \mu_{4°}$, las masas específicas del agua a diferentes temperaturas. Se observa que la densidad del agua es máxima a 4°.

TEMPERATURAS	— 9°	— 5°	0°	4°	8°	20°	30°
DENSIDADES con respecto al agua a 4°	0,998431	0,999302	0,999868	1	0,999870	0,99823	0,99567

Caso del aire. — La masa específica del aire a 0° y a la presión de 760 mm de mercurio se ha determinado con precisión, midiendo la masa de aire seco que llena a 0° un balón de unos cuantos litros, cuyo volumen a 0° se ha determinado por una medida con agua destilada.

La masa del litro de aire a 0° y 760 es $a_{0.760} = 1{,}293$ g/litro. La masa de litro de aire a $t°$, presión p mm de mercurio, se deduce de la fórmula anterior teniendo en cuenta las leyes de dilatación y de compresibilidad del aire; se obtiene

$$a_{t.p} = a_{0.760}\,\frac{p}{760}\cdot\frac{1}{1+\alpha t}.$$

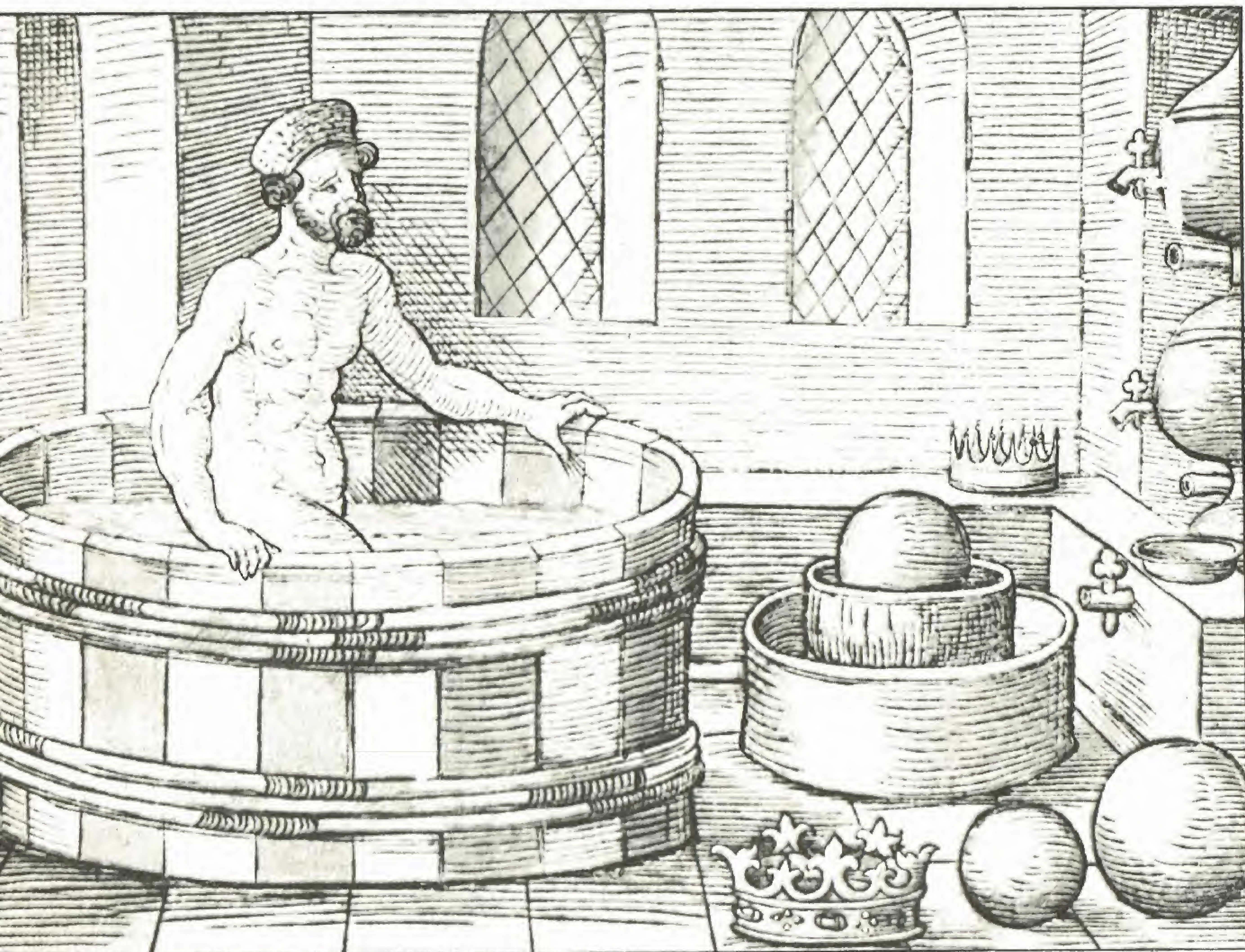
Caso de los gases. — La determinación de la masa específica de los difrentes gases se reduce a la determinación, más sencilla, de sus densidades relativas con respecto al aire, utilizando la fórmula ya indicada: $\mu = a \cdot d$.

De donde resulta que la masa de un volumen v de gas, en las condiciones t y p de temperatura y de presión, viene dada por la fórmula

$$m = v \cdot a_{0.76} \cdot d \cdot \frac{p}{760}\cdot\frac{1}{1+\alpha t}\qquad \left\{\begin{array}{l} m, \text{ en gramos.}\\ v, \text{ en litros.}\\ a_{0.76} = 1{,}293.\\ p, \text{ en milímetros de mercurio.}\\ t, \text{ en grados centesimales.}\\ \alpha = 1/273.\end{array}\right.$$

Resultados. En el cuadro de la página anterior se resumen algunos resultados de medidas de densidades: 1°, cuerpos simples sólidos y líquidos a 20°; 2°, minerales; 3°, piedras preciosas; 4°, cuerpos gaseosos.

Arquimedes resuelve el principio de la presión ejercida por el agua sobre los cuerpos sumergidos (Ryff Guyalther, Nuremberg, 1547) [Doc. Biblioteca Nacional, París]



Hidrostática

Reseña histórica. Noción de presión. Unidad de presión. Presión sobre un punto en una pared; presión sobre un punto de un líquido. Teorema fundamental de la hidrostática. Vasos comunicantes. Nivelación. Nivel de burbuja. Pozos artesianos. Principio de Pascal. Prensa hidráulica. Ascensores hidráulicos. Acumulador hidráulico. Gatos hidráulicos. Principio de Arquímedes. Cuerpos flotantes. Cuerpos que flotan entre dos aguas. Cuerpos que flotan en la superficie. Densímetros. Estabilidad de los cuerpos flotantes. Equilibrio de los navíos. Sifón. Vaso de Tántalo

Reseña histórica. — La hidrostática, que estudia la acción de la gravedad sobre los líquidos, fue ya objeto de estudio en la Antigüedad. Se debe a **Arquímedes** cierto número de teoremas, de los cuales el más importante, conocido como *principio de Arquímedes*, es el relativo al empuje que experimenta un cuerpo sólido sumergido en un fluido (empuje vertical, hacia arriba equivalente al peso del fluido desalojado).

La hidrostática no experimentó nuevos adelantos hasta el siglo XVII. **Simon Stevin** explicó la *paradoja hidrostática* (1586), relativa a la presión ejercida por un líquido sobre el fondo de un vaso. Obtuvo de nuevo el principio de Arquímedes y estudió las condiciones de equilibrio de los cuerpos flotantes.

Fue **Pascal** quien, en la misma época, aproximadamente, dio un gran impulso a la hidrostática, precisando la noción de presiones en el interior de los líquidos y estableciendo el principio de transmisión de presiones *(principio de Pascal)* [1653]. Para verificar experimentalmente su principio, ideó Pascal la *prensa hidráulica*, construida en 1795 por **Bramah**.

El problema del navío fue estudiado por **Renau d'Eliçagaray** (1689), **Jean Bernoulli** (1714), **Daniel Bernoulli** (1735), **Clairaut** (1743), **Bouguer** (1746), **Euler** (1749), y después, en el siglo XIX, por **Dupin, Duhamel** y **Guyou**.

DEFINICIÓN. La **hidrostática** *es la parte de la física que estudia el equilibrio de los líquidos en reposo.*

Cuando un líquido está en reposo puede suponerse que una porción del mismo, elemento de volumen o lámina infinitamente delgada (elemento de superficie), se solidifica; basta entonces con limitarse a aplicar los teoremas de la estática de los cuerpos sólidos a elementos inmóviles de líquido.

Noción de presión. — Coloquemos un ladrillo sobre una membrana elástica tensada horizontalmente. La membrana se deforma más si el ladrillo se coloca sobre su lado menor en vez de sobre su lado mayor, y sin embargo la fuerza que producen ambas deformaciones es la misma en ambos casos: el peso P del ladrillo, que permanece invariable (*fig.* 40).

Fig. 40

El efecto de la fuerza P es, por consiguiente, diferente según la superficie de contacto sobre la que se ejerce dicha fuerza. Se dice que el ladrillo ejerce presiones diferentes en ambos casos.

Cuando una fuerza F se ejerce uniformemente sobre una superficie S, se denomina presión p ejercida por esta fuerza al cociente $p = \dfrac{F}{S}$.

Es importante evitar toda confusión entre fuerza y presión, que son magnitudes físicas diferentes.

Unidad de presión. — En el sistema C.G.S., la unidad de presión es la presión ejercida por la unidad de fuerza, es decir, la dina, por centímetro cuadrado. Esta unidad se denomina *baria*. En el sistema M.T.S., la unidad de presión definida, en forma análoga, es la *pieza*, que es la presión ejercida por una fuerza de un esteno sobre una superficies de un metro cuadrado.

Se emplea también como unidad de presión el *kilogramo-fuerza por centímetro cuadrado*, o bien se calculan las presiones en *columna de mercurio "normal"*, es decir, de mercurio a 0° C, tomando la aceleración de la gravedad al nivel del mar y a la latitud 45°, $g_{0\cdot 45} = 980{,}665\ \text{cm/s}^2$.

Presión sobre un punto en una pared; presión sobre un punto de un líquido. — Consideremos un elemento de pared de un vaso que contiene un líquido en equilibrio; se demuestra fácilmente que este elemento está sometido a una fuerza f, normal al elemento y proporcional a su superficie s. La relación constante $\dfrac{f}{s} = p$ caracteriza lo que se llama "presión" del líquido sobre el elemento de pared.

Por ejemplo (*fig.* 41), la membrana de caucho C se deforma bajo el empuje del líquido; a través de los orificios del recipiente A salen surtidores normales a la pared y que se curvan a continuación por el efecto de la gravedad.

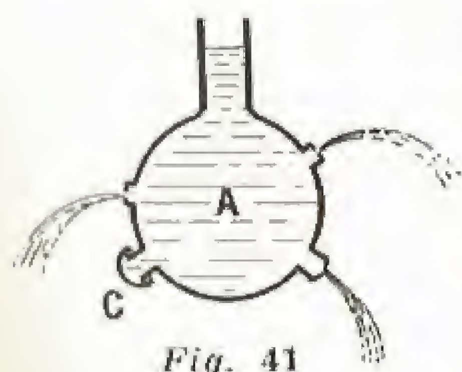


Fig. 41

Esta fuerza de presión se atribuye a los choques incesantes de las moléculas del líquido contra la pared; se puede comparar esta acción a la de un chorro de arena que acabara de golpear un obstáculo. Si las direcciones de las velocidades de los granos de arena se dirigen al azar, como ocurre con las velocidades de las moléculas líquidas, la fuerza resultante es, por razón de simetría, perpendicular a la pared, lo que caracteriza una fuerza de presión.

Para definir la presión en un punto P interior a la masa líquida, se imagina en este punto un elemento de superficie s, y se denomina "presión" en P al cociente $\dfrac{f}{s}$ de la fuerza f, normal al elemento s, por la magnitud s de la superficie.

Puede ponerse de manifiesto (*fig.* 42) esta presión en el seno de un líquido por medio de una cápsula de Marey. Consiste en una caja lisa, de poca superficie, una de cuyas caras está cerrada por una membrana de caucho; se comprueba que la membrana se ahueca bajo la acción de la fuerza de presión, y que la deformación es tanto mayor cuanto más profundamente sumergida en el líquido está la cápsula.

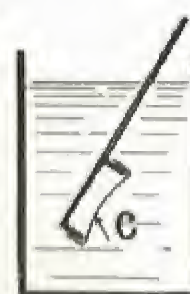


Fig. 42

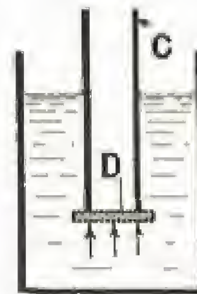


Fig. 43

La figura 43 representa otra experiencia que muestra igualmente la existencia de las fuerzas de presión; en efecto, es la fuerza de presión que se ejerce verticalmente hacia arriba la que mantiene apoyado sobre el borde del cilindro C el disco D, que tendería a descender por su peso.

Teorema fundamental de la hidrostática. — Cabe preguntarse cómo varían las presiones de un punto a otro de la masa de un líquido; el teorema siguiente responde a esta cuestión:

La diferencia de presiones en dos puntos de un líquido en equilibrio es igual al peso de una columna de dicho líquido, de base unidad y altura igual a la distancia vertical entre ambos puntos.

Sean, en efecto (*fig.* 44), dos puntos M y M′ del interior de un líquido y h su diferencia de nivel. Unamos M, M′ y consideremos el cilindro de eje MM′ de generatrices paralelas a MM′ y terminado por dos elementos de superficie s y s' de orientaciones cualesquiera.

Para establecer el teorema, supongamos que el cilindro de líquido se ha solidificado y expresemos que se encuentra en equilibrio bajo la acción de las fuerzas que se le aplican.

La condición necesaria y suficiente de equilibrio de un cuerpo sólido es que la resultante general de las fuerzas aplicadas y el par resultante sean nulos, condición que se expresa mediante seis ecuaciones, ya que es necesario escribir que las tres componentes del par y las tres componentes de la resultante, según los tres ejes, son nulas.

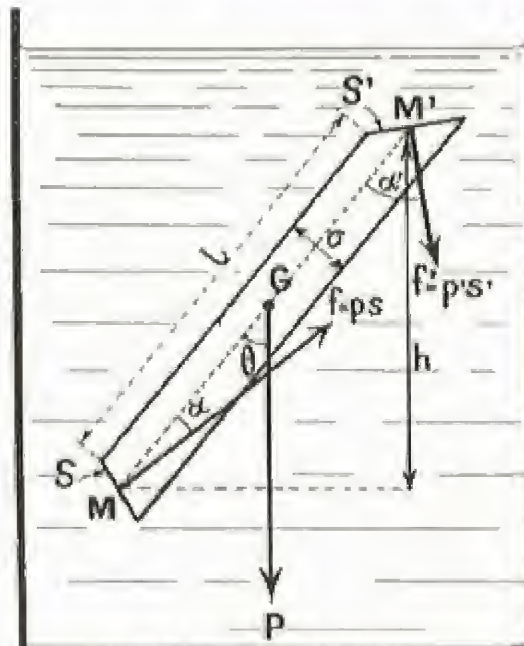


Fig. 44

Para establecer el teorema escribiremos solamente una de estas condiciones: que la componente de la resultante de las fuerzas a lo largo del eje del cilindro es nula.

Las fuerzas que actúan sobre el cilindro, supuesto solidificado, son las fuerzas de presión que se ejercen sobre las paredes y el peso del líquido; las fuerzas de presión sobre las paredes laterales son normales a dichas paredes y, por consiguiente, al eje del cilindro: sus componentes según el eje son nulas; las fuerzas de presión sobre las caras terminales tienen respectivamente como componentes según al eje: $ps \cos \alpha$ y $p's' \cos \alpha'$; la componente del peso es $P \cos \theta$, designando por P el peso del cilindro líquido.

La condición de equilibrio será, pues,

(1) $p's' \cos \alpha' + P \cos \theta - p \cdot s \cos \alpha = 0.$

Sea, por otra parte, σ la sección recta del cilindro; se tendrá

(2) $s \cos \alpha = s' \cos \alpha' = \sigma;$

el peso del líquido es igual al producto del volumen ($\sigma \times l$) por el peso específico ω:

(3) $P = \sigma \times l \times \omega;$

la ecuación (1) se transforma en

$$p'\sigma + \sigma l \cos \theta \cdot \omega - p\sigma = 0,$$

de donde $p - p' = h\omega$, puesto que $l \cos \theta = h$.

h es la medida del volumen de un cilindro de altura h y de sección unidad; $h\omega$ representa el peso de este cilindro de líquido, lo que demuestra el teorema.

De este teorma fundamental pueden deducirse ciertos corolarios muy importantes.

COROLARIOS. 1° *En el seno de un líquido en equilibrio, la presión en todos los puntos de un mismo plano horizontal es la misma.*

En efecto, en este caso $h = 0$, $p = p'$.

2° *La superficie libre de un líquido en equilibrio es plana y horizontal.*

En efecto, en dos puntos de la superficie libre la presión es la misma, e igual a la presión del gas situado sobre el líquido:

$$p = p',$$

por consiguiente, $h = 0$.

Corolario. Cuando varios líquidos no miscibles se encuentran en un mismo recipiente, se superponen por orden de densidad, yendo al fondo los más densos, y siendo la superficie de separación entre dos líquidos consecutivos plana y horizontal.

La primera parte es un resultado experimental. Demostremos la segunda parte: sean, en efecto (*fig.* 45), M y M' dos puntos cualesquiera de la superficie de separación y h su diferencia de nivel; en el primer líquido, de peso específico ω_1, se tendrá $p - p' = h\omega_1$, y en el segundo,

$$p - p' = h\omega_2, \quad \text{de donde} \quad h(\omega_2 - \omega_1) = 0;$$

como los dos líquidos tienen pesos específicos diferentes, $\omega_2 - \omega_1 \neq 0$, y por consiguiente $h = 0$, dos puntos cualesquiera M y M' de la superficie de separación se encuentran en un mismo plano horizontal; esta superficie es, pues, plana y horizontal.

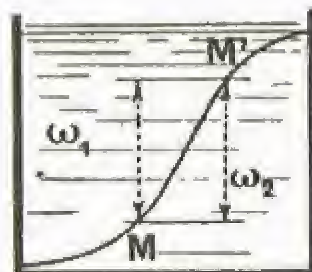


Fig. 45

Vasos comunicantes. — El teorema fundamental y sus corolarios se han establecido sin hacer ninguna hipótesis sobre la forma del vaso que contiene el líquido, y por consiguiente, se aplican cualquiera que sea dicha forma; cuando, en particular, dos vasos comunican, pueden considerarse como un vaso único; las superficies libres son, por consiguiente, planas y horizontales.

Nivelación. — Se denomina nivelación la operación que consiste en determinar las diferencias de nivel que existen entre los diferentes puntos de un terreno.

Para esta operación puede utilizarse un nivel de agua formado por un tubo estrecho de un metro de longitud aproximadamente, que pone

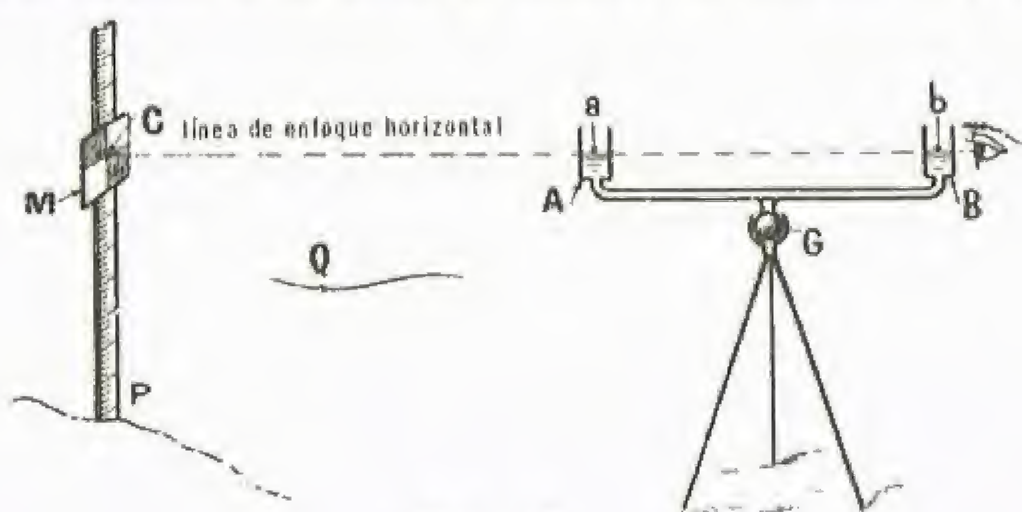


Fig. 46

en comunicación dos vasos A y B (*fig.* 46) de sección más ancha. El nivel está soportado por un trípode con un cojinete móvil G que permite su orientación.

Sean dos puntos P y Q, cuya diferencia de nivel se quiere obtener; para ello, un ayudante transporta al punto P una regla graduada que dispone verticalmente y a lo largo de la cual puede deslizarse una mira M, formada por cuatro cuadrados blancos y negros alternativamente, por ejemplo.

El operador dirige el tubo en dirección de la mira, que su ayudante sube o baja hasta que el punto central C de la misma se encuentre en la línea de enfoque horizontal de los niveles a y b del agua en los vasos A y B; entonces anota la distancia PC del pie al centro de la mira, distancia que lee sobre la regla graduada vertical. A continuación el ayudante transporta la mira al punto Q del terreno y determina, como anteriormente, bajo las indicaciones del operador, la distancia QC; como en ambas operaciones el centro de la mira se encuentra en el mismo plano horizontal de enfoque, la diferencia de las lecturas da la diferencia entre los niveles de ambos puntos.

Nivel de burbuja. — Inventado por Thévenot (1666) y perfeccionado por Chézy, el nivel de burbuja consta esencialmente de un tubo de vidrio ligeramente curvado, cerrado y encastrado en una montura de metal, y lleno de alcohol o de éter, con excepción de una burbuja (*fig.* 47). Esta burbuja permanece siempre en equilibrio, en la parte más alta del tubo, de forma que la línea que une sus extremidades es horizontal.

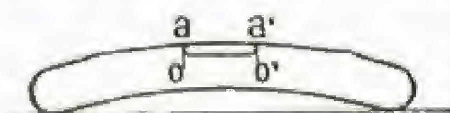


Fig. 47

Cuando el plano de apoyo es horizontal, la burbuja queda situada entre los dos trazos oo' que se señalan oo; aa' es la línea de referencias. El nivel de burbujas suele adaptarse frecuentemente a instrumentos de física con objeto de conseguir la verticalidad de un eje de rotación.

Aplicaciones. Entre las aplicaciones de los vasos comunicantes pueden citarse la circulación de las aguas naturales, la distribución de agua en las ciudades, los saltos de agua, las esclusas y los pozos artesianos.

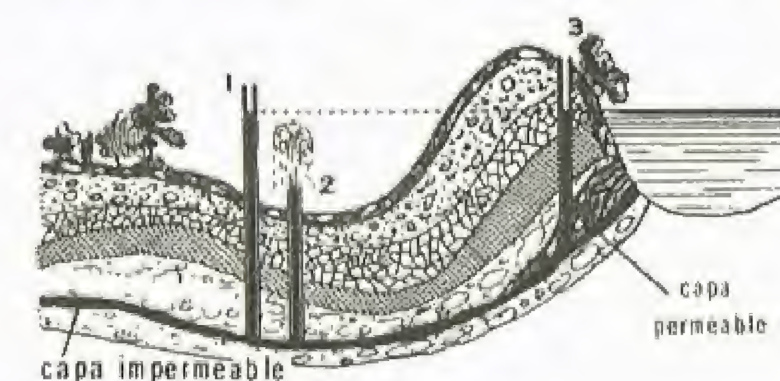


Fig. 48

Pozos artesianos. — Se llaman así los pozos que alcanzan una capa de agua subterránea que comunica con un depósito de agua situado a un nivel más elevado que la superficie del suelo donde se ha perforado el pozo. El agua asciende desde debajo del nivel del suelo hasta el nivel del depósito que alimenta el pozo (*fig.* 48 [1]) si la construcción de este último es suficientemente elevada, o bien en una capa surtidor en el caso contrario (*fig.* 48 [2]). El número 3 de la figura representa un pozo de capa ascendente.

Estos pozos deben su nombre a que, en otra época, eran muy numerosos en la región de Artois.

Principio de Pascal. — *Toda presión ejercida sobre un líquido es transmitida por él íntegramente y en todas las direcciones.*

Apliquemos una fuerza f sobre un émbolo a de superficie s (*fig.* 49). El líquido tiende a levantar el émbolo A de superficie S, comprobándose que para impedir este movimiento es necesario aplicar sobre A una fuerza (1) $F = \frac{S}{s} \cdot f$; esta relación puede escribirse $\frac{F}{S} = \frac{f}{s}$, es decir, que la presión ejercida por el líquido sobre el émbolo A es igual a la presión ejercida sobre el líquido por el émbolo a: por consiguiente el líquido ha transmitido la presión.

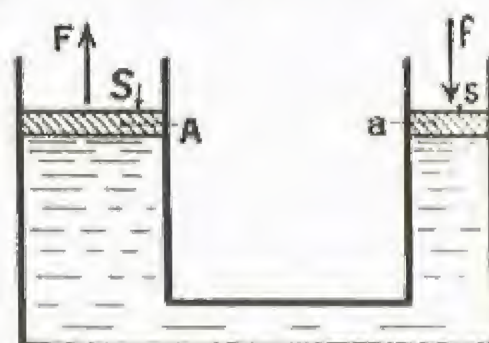


Fig. 49

Esta propiedad distingue claramente los líquidos de los sólidos, que no transmiten las presiones, sino las fuerzas.

La ecuación (1) muestra que ejerciendo una fuerza f sobre el émbolo a, se levanta el émbolo A con una fuerza $\frac{S}{s}$ veces más grande; si la relación entre las secciones es grande, igual a 1 000, por ejemplo, al ejercer sobre a una fuerza de 1 kg se levantará A con una fuerza de 1 000 kg. Este resultado se utiliza en la prensa hidráulica y en los ascensores hidráulicos.

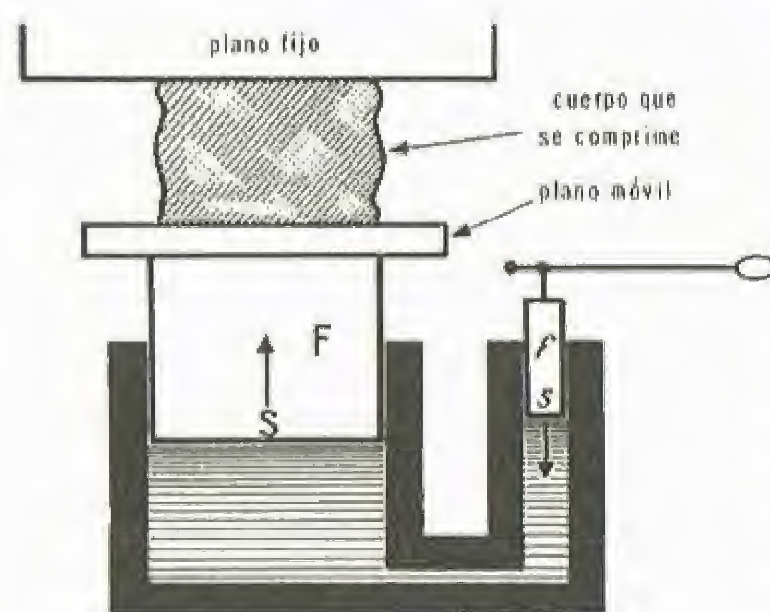


Fig. 50

Prensa hidráulica. — La prensa hidráulica, imaginada por Pascal y construida por Bramah en 1795, consiste en lo siguiente: un cuerpo de bomba muy resistente y lleno de agua con un émbolo, por debajo del cual una bomba impelente de émbolo sumergible envía el agua de un depósito. Esta bomba se acciona a mano o por un motor mecánico (*fig.* 50).

Entre la parte superior del émbolo y un plano situado frente al mismo se aplastan objetos diversos, como granos oleaginosos, para extraer aceites; o también se prensa heno, paja, algodón, para hacer que su transporte sea más fácil, a causa de la disminución de su volumen aparente.

Ascensores hidráulicos. — Estos aparatos tienen un émbolo cuya longitud es la altura que hay que recorrer, y que soporta la caja del ascensor. El émbolo se introduce en un cuerpo de bomba, en donde se inyecta agua a presión que le hace ascender, y hace ascender, por consiguiente, el ascensor. Para el descenso, se suprime la llegada de agua y se deja que corra el agua del cuerpo de bomba, que es expulsada por el peso del sistema móvil (*fig.* 51).

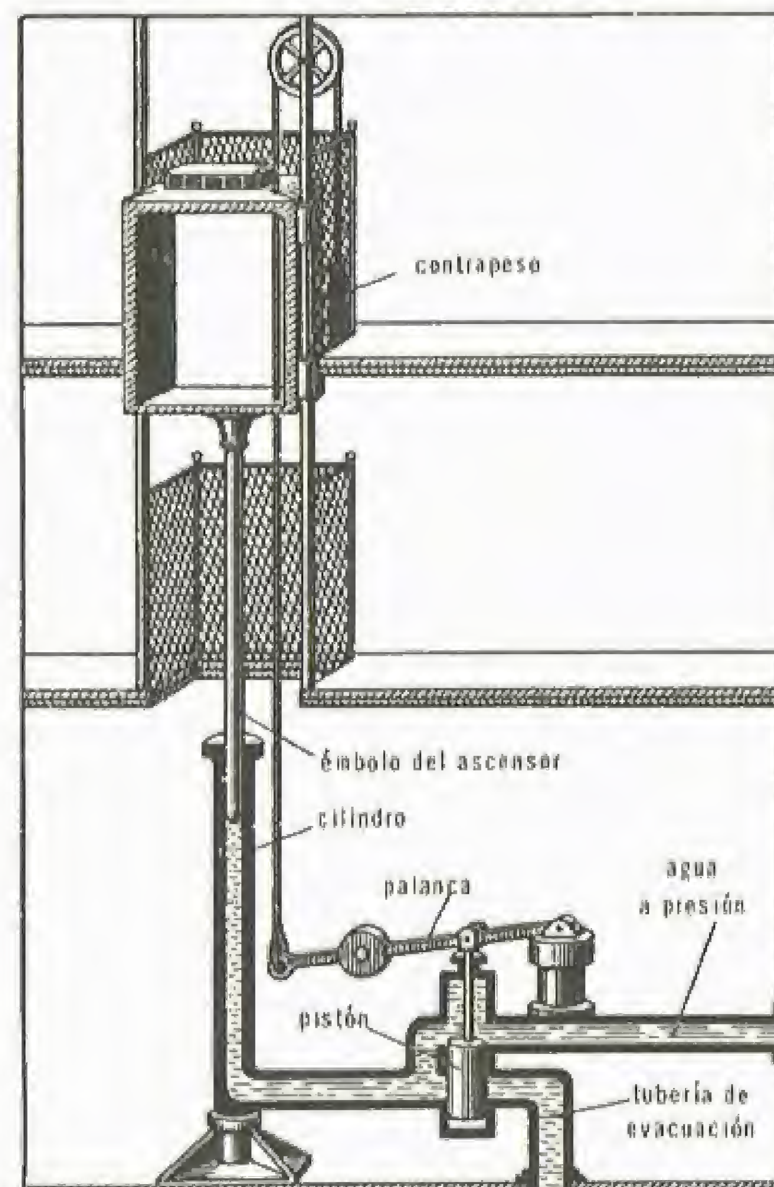


Fig. 51.—Ascensor hidráulico

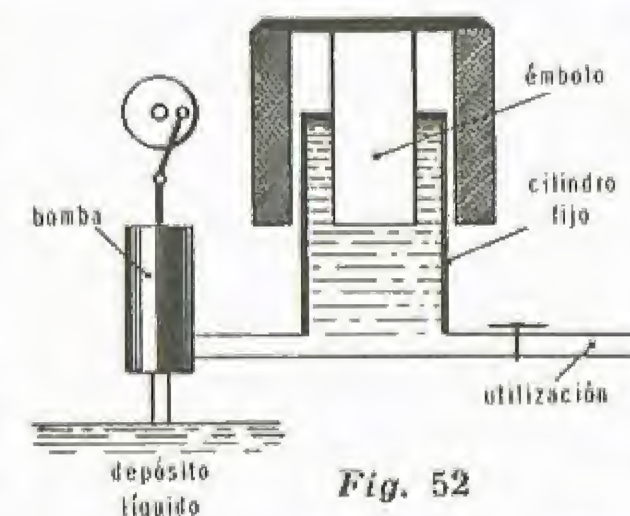


Fig. 52

Acumulador hidráulico. — Inventado por Armstrong, se compone (*fig.* 52) de un cilindro fijo en el que se desplaza verticalmente un émbolo sumergible sobrecargado y guiado. Se alimenta por medio de una bomba que se detiene cuando el acumulador está lleno. La energía del agua así acumulada a presión puede emplearse en un motor hidráulico en cualquier momento hasta la descarga del acumulador. Se emplea para accionar máquinas de marcha

intermitente: grúas, puertas de esclusas, ascensores, prensas de forjar, etc.

Gatos hidráulicos. — Son presas hidráulicas cuya plataforma superior se ha suprimido. El émbolo grande termina en una cabeza que se introduce debajo de la carga que hay que elevar (ejemplo: fuerza 200 t, recorrido del pistón 60 cm).

Principio de Arquímedes. — *Las presiones que se ejercen sobre las paredes de un cuerpo sólido sumergido en un líquido en equilibrio se reducen a una fuerza vertical, de sentido ascendente, igual al peso del líquido desalojado por el sólido. El punto de aplicación de esta fuerza denominada* **empuje de Arquímedes,** *es el centro de gravedad del líquido desplazado, que se denomina* **centro de empuje.**

Antes de demostrar este principio, haremos las siguientes observaciones: hemos visto que sobre cada elemento de superficie sumergida en un líquido se ejerce una fuerza de presión normal a dicho elemento, y es sabido que un sistema de fuerzas cualesquiera aplicadas a un cuerpo sólido puede siempre reemplazarse por una resultante y por un par. El principio de Arquímedes expresa que en el caso de fuerzas de presión, el par es nulo y que el sistema de fuerzas se reduce a una resultante cuya intensidad, dirección, sentido y punto de aplicación indicada.

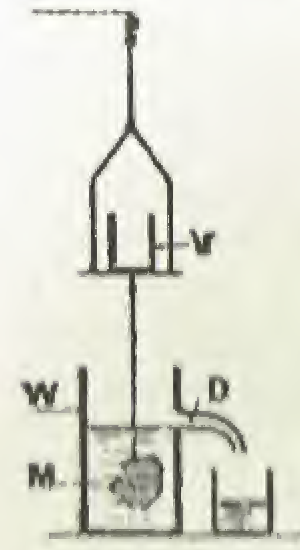


Fig. 53

Para establecer experimentalmente el principio de Arquímedes puede utilizarse una balanza hidrostática, que es una balanza cuya cruz puede levantarse por medio de una cremallera y bajo cuyos platillos se disponen ganchos; una vez levantada la cruz, se suspende uno de los platillos en un cuerpo sólido M (*fig.* 53), colocando sobre el mismo platillo un vaso V; después se hace que la balanza marque cero por medio de una tara conveniente, bajando entonces la cruz por medio de la cremallera de forma que el cuerpo se sumerja en un vaso W, lleno hasta el borde de su tubo de desagüe D. Cualquiera que sea la forma del cuerpo M, su inmersión produce la expulsión por el tubo D de un volumen de líquido igual al suyo; la inmersión del cuerpo destruye el equilibrio en beneficio de la tara, puesto que el empuje de Arquímedes se resta del peso del cuerpo. Si se recoge el líquido que sale del vaso y se le vierte en el vaso V, se comprueba cómo se restablece el equilibrio.

Cuerpos flotantes. — Denominaremos cuerpos flotantes a los sólidos que sumergidos completa o parcialmente en un líquido reciben de este último un empuje que origina una pérdida de peso aparente: si existe igualdad entre las dos fuerzas, el cuerpo flota entre dos aguas, y si el empuje es superior al peso, el cuerpo flota en la superficie del líquido; en cambio, si el peso del cuerpo es superior al empuje, el cuerpo cae al fondo del vaso que contiene el líquido.

Cuerpos que flotan entre dos aguas. — La igualdad de ambas fuerzas se presenta muy raramente de forma rigurosa; veremos a continuación tres ejemplos:

a) *Peces.* Los peces conservan siempre el mismo peso, pero comprimiendo con sus músculos su vejiga natatoria modifican su volumen y, por consiguiente, el empuje de Arquímedes.

b) *Ludión.* Es un cuerpo lleno parcialmente de aire y que comunica con el líquido por un orificio practicado en su parte inferior. Se le coloca en un cilindro lleno de agua y cerrado por una membrana en su parte superior. Cuando se ejerce una presión sobre la membrana, el aire de A se comprime, el agua transmite las depresiones y el aire de B también se comprime; entonces entra agua en el ludión, que aumenta de peso y desciende. Cuando se afloja la membrana, el agua es expulsada del ludión, que vuelve a subir (*fig.* 54).

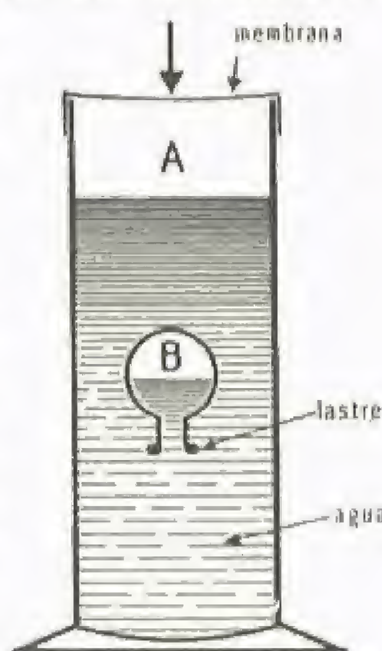


Fig. 54

c) *Submarino.* Es un navío en compartimientos laterales a lo largo del casco que pueden llenarse de agua. Para sumergirse se deja que el agua penetre en estos tanques o cámaras de flotación ("water-ballasts"), lo que produce un aumento de peso, con la consiguiente inmersión del navío. Al expulsarse el agua por medio de aire comprimido, disminuye el peso y el navío vuelve a ascender a la superficie.

Un submarino no puede, por consiguiente, mantenerse en equilibrio entre dos aguas, ya que este equilibrio es inestable. Supongamos que el submarino flota a una profundidad h y que se produce una disminución muy pequeña de volumen; entonces se hunde, aumenta la presión que soporta y su quilla se deforma, disminuyendo de volumen, a tal punto que se hunde cada vez más. Inversamente, si su volumen aumenta accidentalmente, asciende hasta la superficie. Sólo puede conservar su profundidad en marcha, por medio de su timón de profundidad compuesto de alerones orientables.

Cuerpos que flotan en la superficie. — Cuando el cuerpo flota en equilibrio, el empuje de Arquímedes sobre el volumen sumergido es igual al peso del cuerpo. Si el peso específico del líquido es ω, tendremos $V_i \cdot \omega = P$, de donde $V_i = \frac{P}{\omega}$; relación que muestra que el volumen sumergido es tanto menor cuanto mayor sea el peso específico del líquido, e inversamente. Los areómetros y densímetros de peso constante se fundan en esta propiedad.

Densímetros. — El densímetro es una varilla fina de vidrio (*fig.* 55) que se prolonga por su base con dos ampollas A y B; la ampolla inferior lleva un lastre, de forma que en el agua pura el aparato se hunde hacia la base O de la varilla. Si el densímetro se coloca en un líquido de densidad menor que la del agua, se hundirá todavía más; la varilla puede graduarse colocando el aparato en líquidos de densidades conocidas. Para líquidos más densos que el agua, se regula el lastre de forma que en el agua pura se hunda hasta el extremo S de la varilla.

La densidad de una mezcla de alcohol y de agua varía según la proporción de alcohol; un densímetro puede graduarse directamente sumergiéndolo en mezclas de alcohol y agua de proporciones conocidas; el aparato graduado de esta forma se denomina alcohómetro (Gay-Lussac).

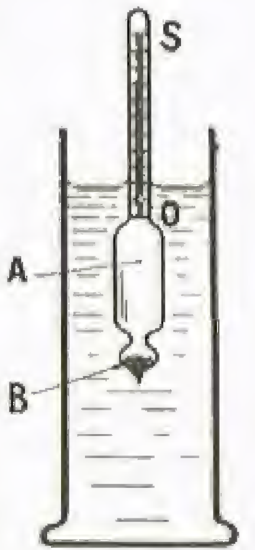


Fig. 55

Estabilidad de los cuerpos flotantes. Equilibrio de los navíos. — Un cuerpo flotante en equilibrio cumple dos condiciones: 1º Su peso es igual al peso del líquido desplazado; 2º Su centro de gravedad y su centro de empuje están situados en la misma vertical.

Para que este equilibrio sea estable, cuando se desplaza el cuerpo flotante, por ejemplo, basta con que el centro de gravedad quede por debajo del centro de empuje. Los navíos obedecen a estas leyes. El volumen de agua que desplaza el navío es, en metros cúbicos, igual al peso del navío evaluado en toneladas. En el agua del mar el desplazamiento es menor, porque la densidad del agua del mar es algo superior a la del agua dulce. Los navíos estables son los que tienen su centro de gravedad muy bajo, lo que se consigue colocando una carga pesada en la quilla, aunque para la estabilidad del navío no es necesario que el centro de gravedad esté situado debajo del centro de empuje, a causa de los desplazamientos de este último en los movimientos de oscilación del navío.

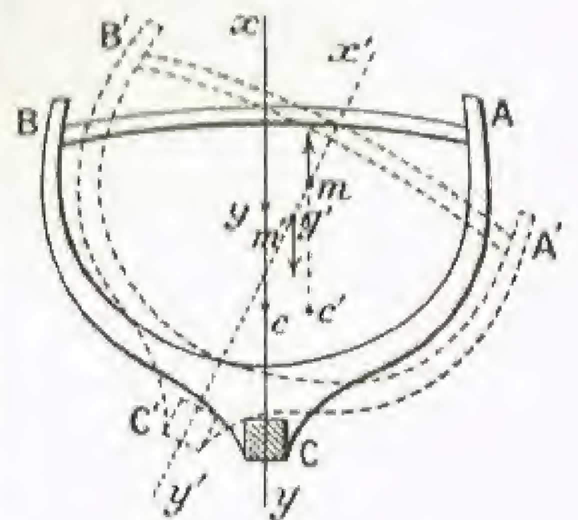


Fig. 56

Cuando el navío oscila, el centro de gravedad no se desplaza con respecto al navío. Supongamos que la vertical xy (*fig.* 56), que une el centro de gravedad g con el centro de empuje c, se desplaza a $x'y'$; g vendrá a g' sobre $x'y'$, pero c ocupará el lugar c' que, con respecto al navío, no ocupa la misma posición que c, porque la forma del líquido desplazado ya no es la misma. La vertical que pasa por c' corta a $x'y'$ en m, denominado metacentro. Se observa fácilmente que, aplicando el empuje en m, en vez de en c', el equilibrio es estable cuando m está por encima de g' e inestable si está por debajo.

Sifón. — El sifón es un tubo curvo con dos brazos desiguales que sirven para transvasar líquidos de un plano superior a otro inferior. Sea un sifón (*fig.* 57) cuyo brazo más corto está sumergido en un líquido situado al nivel N, y el otro en un líquido de la misma naturaleza pero al nivel N'. Supongamos que el sifón está completamente lleno e imaginemos una sección s de este líquido. Sean H y H' las presiones exteriores a los niveles N y N', h la distancia entre los dos niveles y h' la distancia del centro de la sección s al nivel N': la presión ejercida de arriba a abajo sobre la sección s será $H + h - h'$, y la ejercida de abajo arriba $H' - h'$; la diferencia entre ambas presiones será

$$H + h - H'.$$

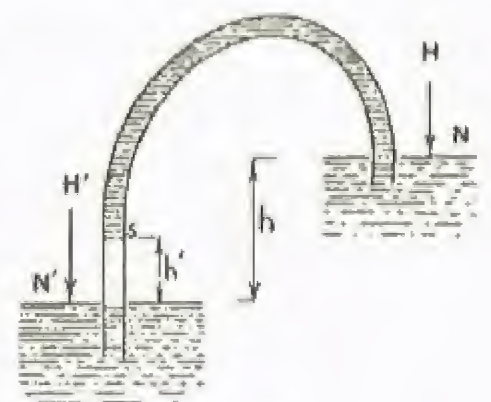
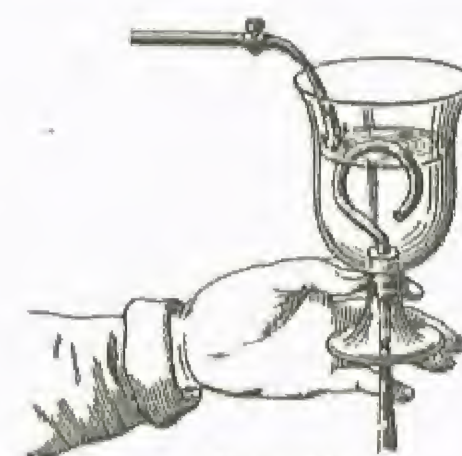


Fig. 57

Si esta diferencia es positiva, el líquido pasará del nivel N al nivel N'; si es nula, hay equilibrio, y si es negativa, el líquido pasa del nivel N' al nivel N.

Si se opera en el aire, $H = H'$, y el líquido pasa del nivel superior al nivel inferior, de acuerdo con el principio de los vasos comunicantes. Para que un sifón funcione debe estar lleno de líquido, es decir, hay que cebarlo.


Fig. 58

Vaso de Tántalo. — Este aparato (*fig.* 58) explica el funcionamiento de las fuentes y de los manantiales intermitentes. Consiste en un sifón de nivel variable cuyo brazo menor se abre cerca del fondo del vaso, mientras que el mayor atraviesa el propio fondo y el pie del vaso. Cuando el recipiente se llena de líquido, el líquido no se vierte hasta que su nivel no alcanza el de la columna superior, en cuyo momento se ceba el sifón y se vacía el vaso. Entonces es necesario llenarlo nuevamente para que el líquido circule.

Bombas de líquido

Bomba aspirante. Bomba impelente. Bomba aspirante impelente. Bomba de doble efecto. Bombas rotatorias. Bombas centrífugas

Bomba aspirante. — Su funcionamiento se basa en la acción exclusiva de la presión atmosférica. Consta (*fig.* 59) de un cilindro o cuerpo de bomba, P, en el que se desplaza un émbolo con una válvula, O, que se abre de abajo a arriba, de un tubo de aspiración que se sumerge en el líquido que hay que elevar y que comunica con el cuerpo de bomba por una válvula S, que se abre también de abajo a arriba. Al elevarse el pistón, se cierra la válvula O, produciendo el vacío debajo de

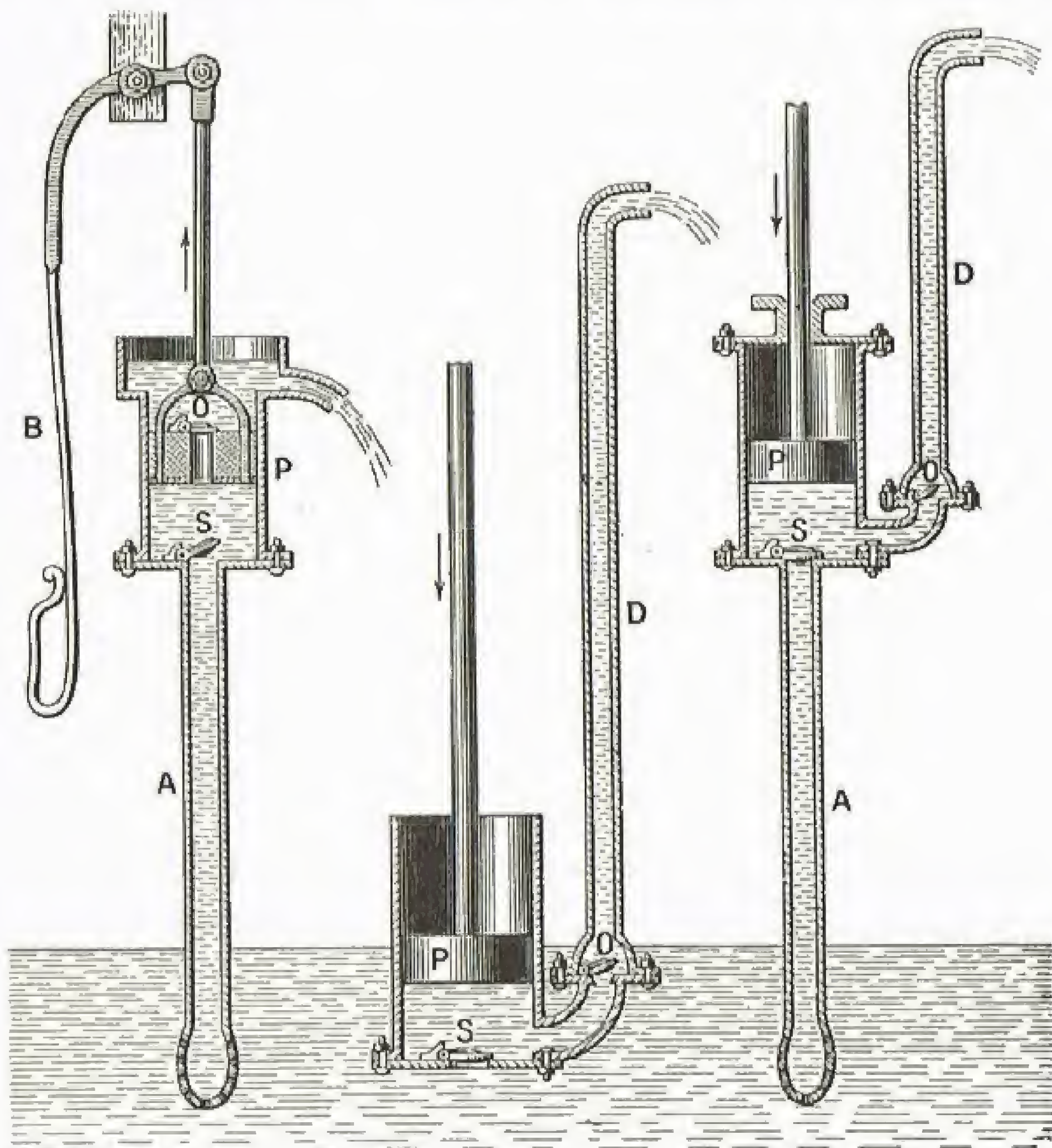


Fig. 59 *Bomba aspirante* *Fig.* 60 *Bomba impelente* *Fig.* 61 *Bomba aspirante impelente.*

ella; el aire contenido en el tubo de aspiración levanta la válvula S y penetra en el cuerpo de bomba. Como la presión que existe en el tubo de aspiración se hace inferior a la presión atmosférica, el líquido asciende hasta cierta altura, que corresponde a la diferencia de presión.

Cuando el émbolo vuelve a descender, la válvula S vuelve a cerrarse inmediatamente a causa de su peso, y la presión del aire aumenta dentro de la bomba sobrepasando a la atmosférica. La válvula O se levanta y el aire se escapa al exterior.

Una serie de recorridos del émbolo hace subir el líquido hasta que penetra en el cuerpo de bomba y pasa al exterior. De este modo se ceba la bomba y proporciona líquido mientras esté funcionando el émbolo. Teóricamente, el ascenso debido al efecto de la presión atmosférica no puede sobrepasar 10,33 m (caso del agua). En la práctica la altura de la columna de aspiración no debe sobrepasar 7 u 8 metros a causa de las entradas de aire por los escapes.

Bomba impelente. — Consta (*fig.* 60) de un cuerpo de bomba que se sumerge directamente en el líquido que hay que elevar y que comunico con el mismo por una válvula S, que permite que el líquido penetre cuando se levanta el émbolo. El émbolo está lleno, y al descender, fuerza al líquido a levantar la válvula O y a elevarse por el tubo lateral. En este caso no existe límite para la altura que se puede alcanzar. Cuando desciende el émbolo, la resistencia que hay que vencer es la del peso de una columna de líquido cuya base es la superficie del émbolo y cuya altura es la distancia vertical entre la fuerza inferior del émbolo y el orificio de desagüe superior.

Bomba aspirante impelente. — En este tipo de bomba, que es una combinación de las dos anteriores (*fig.* 61), el émbolo está completo, y los tubos de aspiración A y de compresión D desembocan en la base del cilindro y están provistos de válvulas que se abren de abajo a arriba. Cuando la bomba funciona, el líquido es aspirado por A durante el ascenso del émbolo y comprimida en D durante su descenso.

Bomba de doble efecto. — En las bombas descritas anteriormente, la circulación del líquido es intermitente; se detiene cuando el émbolo desciende (bomba aspirante) o cuando se eleva (bomba impelente). Se consigue una circulación continua con bombas de doble efecto a las cuales se añade un depósito de aire Z (bomba de incendio) (*fig.* 62). También se pueden reunir dos cuerpos de bomba en un colector común.

Bombas rotatorias. — En estas bombas, el líquido es desplazado por órganos que giran sin interrupción. Puede citarse las *bombas de paletas* (*fig.* 63) compuestas por un recipiente de bronce dentro del cual gira un tambor T provisto de cuatro paletas móviles. Se hace girar el tambor y se consigue, mediante muelles, que las paletas móviles P se apoyen constantemente sobre el contorno interior del cuerpo de bomba. El agua se aspira por A y se expulsa por R. Estas bombas se desgastan rápidamente a causa del frotamiento y son de bajo rendimiento.

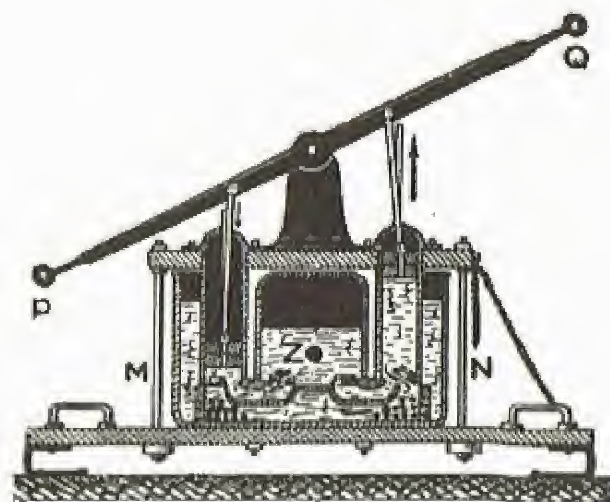


Fig. 62

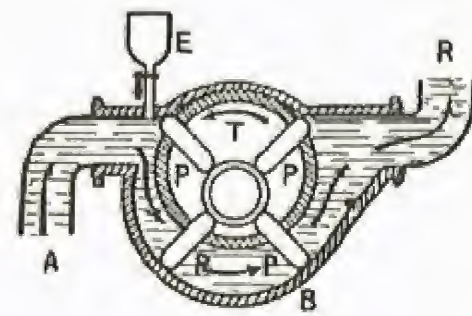


Fig. 63

Bombas centrífugas. — La elevación del agua se produce por reacción entre el fluido que hay que elevar y una rueda con cangilones que gira rápidamente accionada por un motor (*fig.* 64). El agua penetra por el conducto de aspiración hacia el centro de la rueda, es arrastrada por los cangilones y empujada por la fuerza centrífuga hacia el exterior, en donde es recogida por un colector que la evacua por el

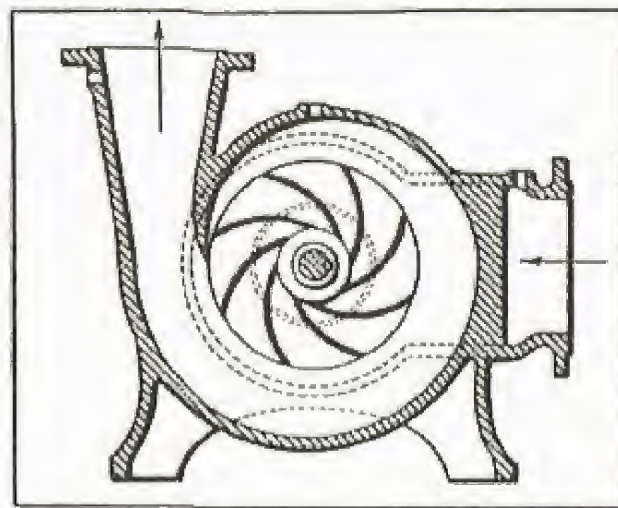


Fig. 64

conducto de escape. Durante mucho tiempo, estas bombas sólo se utilizaron para elevaciones de poca altura; en la actualidad se agrupan para constituir bombas de varios elementos, cada uno de los cuales aspira en el precedente y comprime el siguiente, de forma que se pueden obtener presiones muy elevadas (25 a 30 m por elemento). Estas bombas son de menor rendimiento que las de émbolo, pero ocupan menos espacio y vibran menos. Se utilizan como bombas de incendio, como bombas de extracción en las minas, y en el dragado de los ríos.

Hidrodinámica

Reseña histórica. Teorema de Torricelli. Contracción de la vena. Vaso de Mariotte. Ariete hidráulico. Tubo Pitot. Fenómeno de Venturi. Flujo laminar. Pérdida de carga

Reseña histórica. — La **hidrodinámica**, creada por **Torricelli** y **Newton**, fue estudiada por **Daniel Bernoulli** (1738), **d'Alembert**, **Pitot** y otros. **Euler** y **Lagrange** formularon sus ecuaciones generales. La hidrodinámica estudia las leyes que rigen el movimiento de los fluidos no elásticos, así como las resistencias que éstos oponen a los cuerpos que se mueven en el seno de los fluidos.

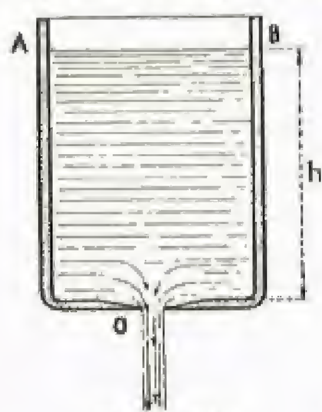


Fig. 65

Teorema de Torricelli. — Consideremos un líquido en equilibrio dentro de un depósito en el que se ha practicado un orificio en un punto O de su pared y de sección relativamente pequeña comparada con la del recipiente. La velocidad de salida del líquido, estudiada primeramente por Torricelli, responde al siguiente teorema: *la velocidad de salida de un líquido por un orificio relativamente pequeño practicado en pared delgada es igual a la que adquiriría un sólido que cayera libremente en el vacío desde la superficie libre del depósito hasta el centro del orificio.*

Si h es la altura del nivel sobre el centro del orificio en el instante considerado (*fig.* 65), se tendrá

$$V = \sqrt{2gh}.$$

Puede demostrarse por el siguiente razonamiento: durante el instante infinitamente pequeño en que la masa m del líquido pasa por el orificio O, el nivel del líquido ha descendido. Desde el punto de vista del trabajo de la gravedad, el fenómeno es el mismo que si la masa m del líquido cayera desde la altura h. Por consiguiente, el trabajo de la gravedad será $T = mgh$.

Si el depósito es ancho con respecto al orificio practicado O, como la velocidad del líquido en el interior del recipiente puede despreciarse, el trabajo de la gravedad se transforma en energía cinética de la masa m que ha atravesado el orificio. Se tendrá, pues,

$$mgh = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad \text{de donde} \quad V = \sqrt{2gh}.$$

Contracción de la vena. — El teorema de Torricelli sólo es exacto si se desprecian los frotamientos y si se suponen paralelas las velocidades de todas las partículas en el momento de su salida. En realidad, cuando un líquido sale de un depósito por un orificio circular practicado en pared delgada, el diámetro de la vena o del chorro va disminuyendo hasta una distancia pequeña del orificio (*fig.* 66). Esta contracción de la vena se debe a que los diversos filetes fluidos llegan al orificio desde direcciones diferentes y describen curvas que presentan su concavidad hacia el exterior de la vena. Esta última sólo se vuelve cilíndrica a cierta distancia (sección contraída), siendo la sección del cilindro menor que el orificio (*fig.* 66). La contracción es igual a una fracción c del orificio que se llama *coeficiente del contracción*. Este coeficiente varía para un mismo líquido con la forma y el tamaño del orificio practicado y con la presión del líquido. El principio de Torricelli sólo se aplica cuando h se cuenta a partir de la sección contraída (se denomina h la carga).

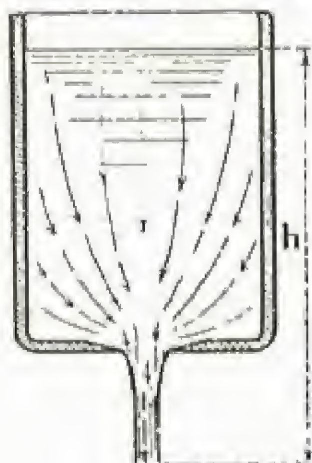


Fig. 66

Vaso de Mariotte. — Es un frasco o vaso que permite una velocidad constante de salida del líquido que contiene. Consiste (*fig.* 67) en un frasco bastante grande lleno de agua y cerrado por un tapón atravesado por un tubo de vidrio abierto por sus dos extremos. Una de las paredes del frasco lleva un tubo que permite vaciarlo.

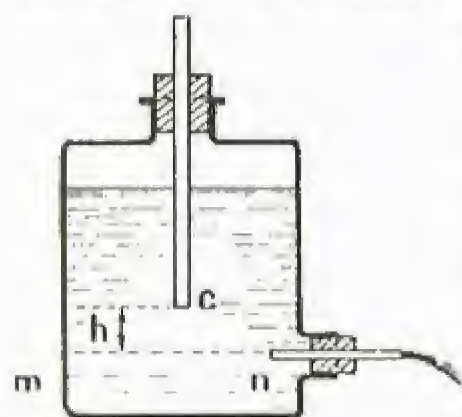


Fig. 67

Si se abre el orificio, sale el agua y es reemplazada por el aire que entra por el tubo vertical. La velocidad de salida del agua es constante, $V = 2gh$, siendo h la diferencia de nivel entre el tubo de salida y el orificio c inferior del tubo, hasta que el nivel del agua en el vaso desciende por debajo de c. En efecto, la salida se debe a la diferencia de presión que existe entre mn y la atmósfera. Como la presión atmosférica se ejerce en c, esta diferencia de presión es sencillamente igual a la presión ejercida por la columna h del líquido.

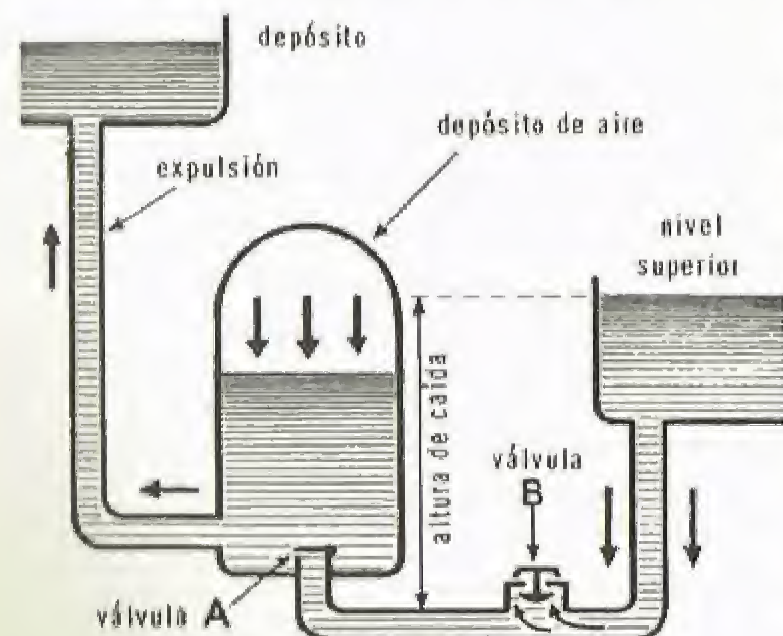


Fig. 68

Ariete hidráulico. — Supongamos que un líquido circula por un tubo con una velocidad V. Si se cierra bruscamente el orificio del tubo, la detención del líquido producirá un choque y la presión aumentaró bruscamente al nivel de este orificio. Montgolfier imaginó, en 1796, utilizar este efecto para elevar el agua: si en el momento de cierre se pone el extremo de la tubería en comunicación con un tubo ascendente, cierta cantidad de agua subirá por este tubo bajo el efecto del exceso de presión. También podrá alcanzar una altura muy superior a la carga que produce la circulación del líquido. Después se cierra el tubo, se restablece la circulación y se reproduce el fenómeno (*fig.* 68).

Tubo Pitot. — Este aparato sirve para determinar el caudal de los cursos de agua, y consiste, en su forma más sencilla, en un tubo en forma de U invertida (*fig.* 69), con dos salidas B y C, cuyo eje es paralelo a la corriente líquida. La abertura B está dirigida hacia la llegada, y consta de un tubo con una llave de paso A que permite que el líquido ascienda por aspiración. El desnivel que se establece en DE, más fácil de medir en D'E' cuando se aspira, permite calcular la velocidad de la corriente.

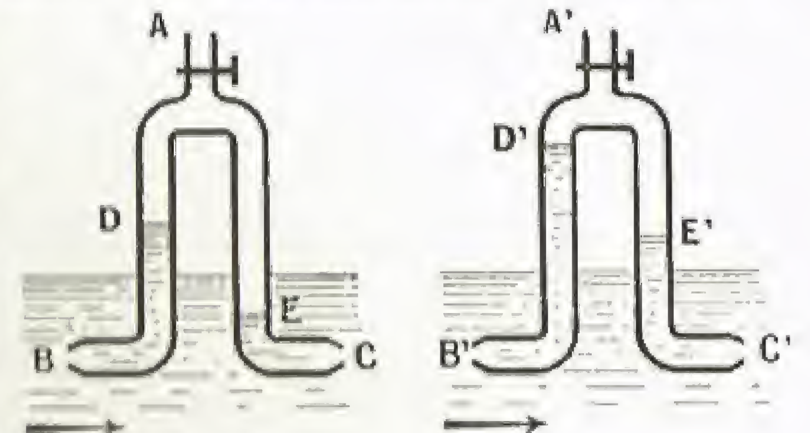


Fig. 69

El tubo de Pitot, que también funciona en una corriente gaseosa, se emplea para medir la velocidad relativa de los aviones con respecto al aire.

Fenómeno de Venturi. — Consideremos un líquido que fluye por un tubo horizontal de sección variable (*fig.* 70).

Si se colocan manómetros en A, B, C, puede observarse que la presión en B es la más baja. El resultado parece paradójico, pero se debe a la mayor velocidad del líquido en B.

Para un flujo horizontal, la energía potencial del líquido depende de su presión, y su energía cinética de su velocidad. Si se desprecian las pérdidas por frotamiento, la energía total de una masa determinada del líquido debe ser la misma cuando está en A que cuando está en B; por consiguiente, si su velocidad aumenta su presión disminuye.

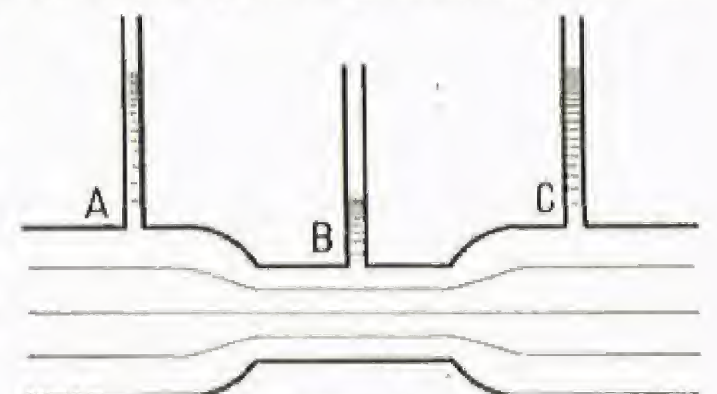


Fig. 70

Cuando la presión A es igual a la presión atmosférica, la presión en B es inferior, y si se practica un orificio, habrá aspiración del aire exterior: éste es el principio de la trompa de agua.

Flujo laminar. Pérdida de carga. — La teoría precedente no concuerda con la experiencia cuando se aplica a tubos de gran longitud y de poca sección, porque entonces habrá que tener en cuenta las fuerzas de frotamiento entre el líquido y la pared, entre las propias partículas líquidas (viscosidad) y los fenómenos capilares. En el caso de una velocidad media bastante pequeña, se comprueba que la velocidad no es constante en toda la sección del tubo, sino que disminuye cuando se aproxima suficientemente a las paredes, hasta anularse en contacto con ellas. El líquido se desplaza entonces en filetes paralelos, los cuales se deslizan unos con respecto a otros (flujo laminar).

Resulta de lo anterior que en un tubo cilíndrico por donde fluye la misma cantidad de agua a través de todas sus secciones, la presión disminuye gradualmente a lo largo del tubo. La experiencia que representa la figura 71 permite observar que los niveles del líquido en los tubos manométricos M_1, M_2, etc., y el orificio O se encuentran en la misma recta que corta AB en un punto C, tal que $CB = h_1$ y $CA = h_2$. En A, el líquido, que estaba inmóvil en el vaso (de gran sección), adquiere cierta velocidad que se conserva a lo largo del tubo. La disminución de presión debida a los frotamientos consume la fracción h_2 de la carga. La velocidad depende de h_1 y su valor será:

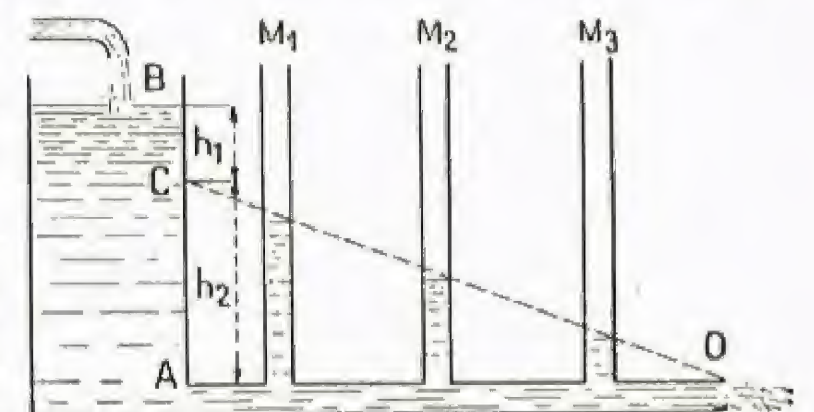


Fig. 71

$$V = \sqrt{2gh_1}.$$

La altura h_2 se denomina pérdida de carga.

Alain Touren

Capilaridad

Reseña histórica. Fuerzas capilares. Leyes de Jurin. Experiencias de Van der Mensbrugghe y Terquem. Fuerzas moleculares de cohesión. Tensión superficial. Energía superficial de un líquido. Diferencia de presión entre las dos partes de la superficie de separación de dos fluidos. Imbibición. Estalagmometría

Reseña histórica. — La capilaridad fue descubierta por **Leonardo de Vinci. Segner,** en 1752, expuso una teoría muy acertada, asimilando la capa superficial de un líquido a una membrana elástica, teoría que fue desarrollada por **Young** en 1805. En ese mismo año, **Laplace** dio una explicación más profunda de los fenómenos capilares. **Gauss,** en 1831, estableció la fórmula fundamental de la tensión superficial. **Plateau** (1801-1883), **Reynolds** y **Rucker** (1883), **Rayleigh** (1892), **Devaux** y **Perrin** estudiaron las capas delgadas.

La ley de **Jurin** sobre los ascensos capilares data de 1718, pero ya había sido enunciada por **Borelli** en 1670.

Fuerzas capilares. — En la hidrostática se han considerado únicamente las fuerzas debidas a la gravedad y las fuerzas de presión que, en general, son las más importantes. En la superficie de los líquidos existen, además, otras fuerzas llamadas *fuerzas capilares* que, en condiciones experimentales particulares, originan fenómenos que contradicen los enunciados de las leyes de la hidrostática.

Estos fenómenos son fáciles de observar: la tinta que moja la punta de una pluma no presenta una superficie plana horizontal, como tampoco la gota líquida suspendida de la extremidad de un cuentagotas.

Consideremos, por ejemplo, una varilla de vidrio bien limpia; si se la sumerge en agua, se comprueba que la superficie del agua se levanta al contacto de la varilla y se adhiere tangencialmente a ella (*fig.* 72); se dice entonces que el agua y todos los líquidos que se comportan análogamente, "mojan" la varilla sólida; si se sumerge la misma varilla, esta vez engrasada, en mercurio, cuya superficie se ha rociado, previamente, con un poco de polvo de licopodio o de fragmentos de corcho, se comprueba que la superficie del mercurio se deprime al contacto con la varilla, y forma con ella un ángulo llamado "ángulo de adherencia" que, en el caso del mercurio, es de 45° (*fig.* 73). A medida que se hunde la varilla, las partículas de licopodio son arrastradas como lo serían si la superficie del líquido fuera una membrana de caucho (experiencia de Pasteur).

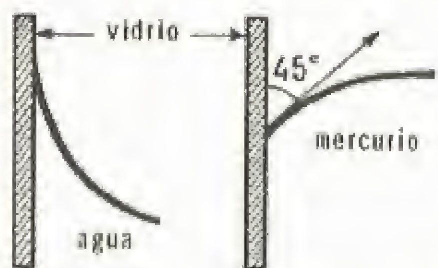


Fig. 72 *Fig.* 73

Cuando los líquidos presentan un ángulo de adherencia con una superficie sólida se dice que "no mojan esta superficie".

Con tubos de diámetros pequeños ($d < 3$ mm), denominados "tubos capilares", se observa fácilmente ya una ascensión (con los líquidos que mojan) ya una depresión del líquido. La altura h de ascenso o de depresión es tanto mayor cuanto menor es el diámetro del tubo (*figuras* 74 y 75).

El ascenso del agua por un trozo de azúcar (cuerpo poroso que presenta canales finos), la del aceite por una mecha o la de la savia por el tallo de una planta son ejemplos de fenómenos capilares del mismo orden.

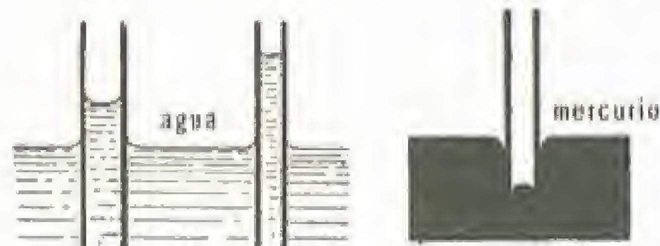


Fig. 74 *Fig.* 75

Para evitar esta dificultad, los tubos manométricos o barométricos tienen un diámetro del orden del centímetro.

Leyes de Jurin. — Jurin estudió la variación de la altura de ascenso de un líquido en función del diámetro del tubo:

1° La altura del ascenso es inversamente proporcional al radio del tubo y al peso específico del líquido: $h = \dfrac{2A}{R \cdot \rho}$.

La constante A se denomina "constante capilar". En el caso del agua y del aire, A = 80 en unidades C.G.S.; el peso específico del agua, expresado en C.G.S., es 980 dinas/centímetro cúbico (de una manera general, $\rho = \mu g$, siendo μ la masa específica); para un tubo de una centésima de centímetro de radio, la altura de ascenso es 16 cm;

2° Los líquidos que no mojan presentan una depresión proporcional al coseno del ángulo de adherencia, inversamente proporcional al radio del tubo y al peso específico del líquido: $h = 2A \cdot \dfrac{\cos \alpha}{R \cdot \rho}$.

He aquí los valores de las tensiones superficiales de algunos líquidos al contacto con el aire, el agua o el mercurio a temperatura ambiente:

	AIRE	AGUA	MERCURIO
Agua	80	0	418
Mercurio	540	418	0
Alcohol	25,5	0	399
Petróleo	31	28	284

Observación. Los líquidos que tienen una constante capilar relativa nula se mezclan; tal es el caso del agua y el alcohol.

Experiencias de Van der Mensbrugghe y Terquem. — Consideremos (*fig.* 76) una varilla ligera MN (una paja), suspendida por dos hilos AM, BN a una varilla AB; si se sumerge este cuadro en una solución glicerinada o azucarada de jabón y se le retira, se comprueba que el líquido sostiene la varilla MN, como lo haría una membrana elástica, pudiendo incluso suspenderse pesos ligeros. Los hilos se curvan según dos arcos de circunferencia.

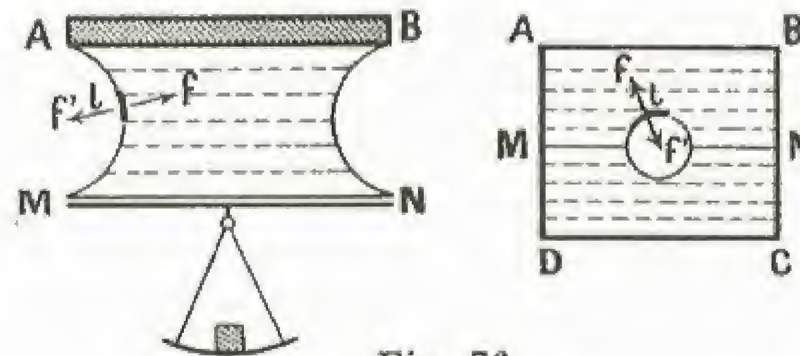


Fig. 76

Se puede entonces, como hizo Terquem, tomar un bastidor (de alambre) ABCD, con un hilo a lo largo de MN que forma un lazo en su punto medio; se sumerge el bastidor en la solución de jabón retirándolo con precaución: el líquido forma una especie de membrana elástica tensa en el bastidor; si se perfora esta membrana con una aguja ligeramente calentada, en el interior del lazo, éste adopta la forma de una circunferencia.

Estas experiencias conducen a asimilar la superficie de separación de dos fluidos no miscibles a una membrana elástica muy delgada, igualmente tensa en todos los sentidos. Esta membrana no existe en realidad, y no puede separársela del líquido. Las tensiones observadas tienen su origen en las fuerzas de atracción que ejercen entre ellas las moléculas.

Fuerzas moleculares de cohesión. — Las moléculas próximas de un gas, y todavía más las de un líquido, se atraen mutuamente. Para las moléculas interiores al fluido, tales como M_1, M_2, ..., las fuerzas de atracción debidas a las moléculas que las rodean se equilibran (*fig.* 77); no ocurre lo mismo con las moléculas superficiales M, M′ ..., cuando la resultante f de las fuerzas de atracción de las moléculas de uno de los fluidos no es igual a la resultante F de las fuerzas de atracción de las moléculas del otro fluido.

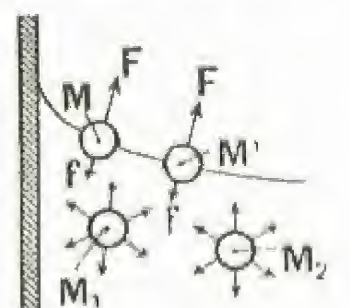


Fig. 77

Estas fuerzas de cohesión se ponen de manifiesto en la experiencia del martillo de agua (*fig.* 78): en el aparato se ha practicado un vacío riguroso y contiene agua; una vez colocado el tubo en la posición a, se le levanta (posición b), pudiendo observarse que, en contradicción con el principio de la hidrostática, el agua permanece en la parte tubular; igualmente, cuando se deja enfriar un tubo de vidrio cerrado y lleno por completo de agua tibia, el agua sigue adhiriéndose a las paredes, aunque el enfriamiento tiende a disminuir su volumen.

Tensión superficial. — Consideremos un elemento lineal l de la línea de separación de la superficie de dos fluidos (*fig.* 76): este elemento está sometido a la diferencia $F = f - f'$ de las fuerzas de atracción f y f' que ejercen las moléculas situadas a una y otra parte del elemento; se denomina "tensión superficial" la fuerza por unidad de longitud: $A = F/l$.

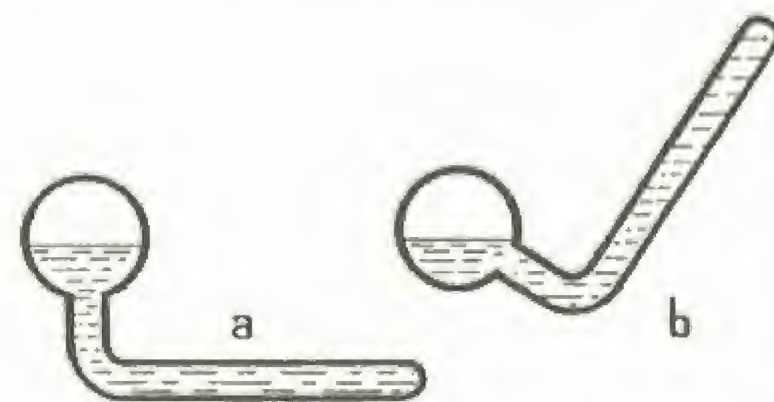


Fig. 78

Es fácil mostrar que la tensión superficial así definida es igual a la constante capilar. Consideremos, en efecto, el ascenso en un tubo de un líquido que moja: la longitud de la línea de separación entre la superficie del líquido y el aire es igual a $2\pi R$, y la fuerza capilar debida a la tensión superficial es igual a $2\pi RA$; esta fuerza sostiene un cilindro de altura h, y es igual al peso de este cilindro. Por consiguiente, se tendrá $2\pi RA = \pi R^2 h \cdot \rho$, de donde $h = \dfrac{2A}{R \cdot \rho}$. La constante capilar A, que figura en la expresión de la ley de Jurin, es precisamente igual a la tensión superficial.

Energía superficial de un líquido. — Volvamos a la experiencia que se representa en la figura 77 (a la izquierda): en cada cara de la lámina líquida se ejerce, sobre el elemento MN, una fuerza $\varphi = A \cdot MN$; si la varilla MN se levanta una altura d, el trabajo de las fuerzas capilares será $T = A \cdot NM \cdot d$; este trabajo que mide la variación de la energía potencial de la superficie y, por consiguiente, la energía por unidad de superficie será $A = \dfrac{T}{MN \cdot d}$; como la energía

de un sistema tiende hacia un mínimo, este resultado explica la experiencia de Plateau, consistente en que cuando una gota de aceite se introduce en un líquido de la misma densidad adopta una forma esférica, o el hecho bien conocido de que las pequeñas gotas de mercurio son esféricas y tienden a aglomerarse en gotas más gruesas, disminuyendo por esta aglomeración su superficie total.

Si en un punto de la superficie libre de un líquido se produce una deformación, la energía consumida origina la formación de ondas circulares que se propagan sobre la superficie.

Diferencia de presión entre las dos partes de la superficie de separación de dos fluidos. — La desigualdad de las fuerzas de atracción que sufren las moléculas superficiales por parte de las moléculas próximas en los dos fluidos origina una fuerza normal a la superficie de separación, que actúa como una fuerza de presión; Laplace estableció que esta diferencia de presión es igual a

$$p = A\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right),$$

siendo R y R' los radios de curvatura principal de la superficie de separación en el punto considerado.

Si la superficie es esférica, ambos radios principales de curvatura son iguales al radio de la esfera, y la diferencia de presión, al pasar de la concavidad de la superficie a su convexidad, es $p = 2A/R$.

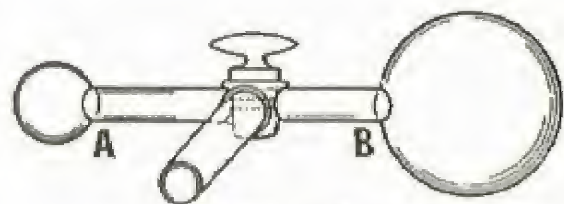


Fig. 79

En una burbuja de jabón, por ejemplo, hay un exceso de $4A/R$, puesto que al ir del interior al exterior de la burbuja se atraviesa dos veces la superficie líquida; contrariamente a lo que podría pensarse, la presión es mayor en el interior de una burbuja de radio pequeño que en el interior de una burbuja que tenga un radio mayor, lo que se pone fácilmente de manifiesto: una llave de paso triple (*fig.* 79) permite insuflar en los extremos A y B de un tubo de vidrio dos burbujas de jabón de radios diferentes; si se ponen después en comunicación ambas burbujas, se observa que la más pequeña se deshace dentro de la grande, lo que corresponde a una disminución de la superficie y, por consiguiente, de la energía superficial.

La formación de burbujas muy pequeñas de vapor en el seno de un líquido exige presiones considerables; lo que explica los "retrasos de la ebullición" de los líquidos que no contienen burbujas gaseosas que sirvan de germen a las burbujas de vapor.

Imbibición. — Se denomina *imbibición* la impregnación de un cuerpo sólido por un líquido; esta impregnación se produce en los cuerpos porosos: azúcar, piedra pómez, esponjas, tejidos fibrosos; el ascenso del líquido es debido a las fuerzas capilares, cuya magnitud depende de la constante capilar y, por consiguiente, del estado superficial del sólido: por este motivo, el algodón natural, más o menos recubierto de materias grasas, no se imbibe; una vez desengrasado mediante el lavado en una solución de sosa, se obtiene algodón "hidrófilo", que se embebe y retiene el agua.

El pelo, la lana y las plumas de los animales están también protegidos de la imbibición por materias grasas.

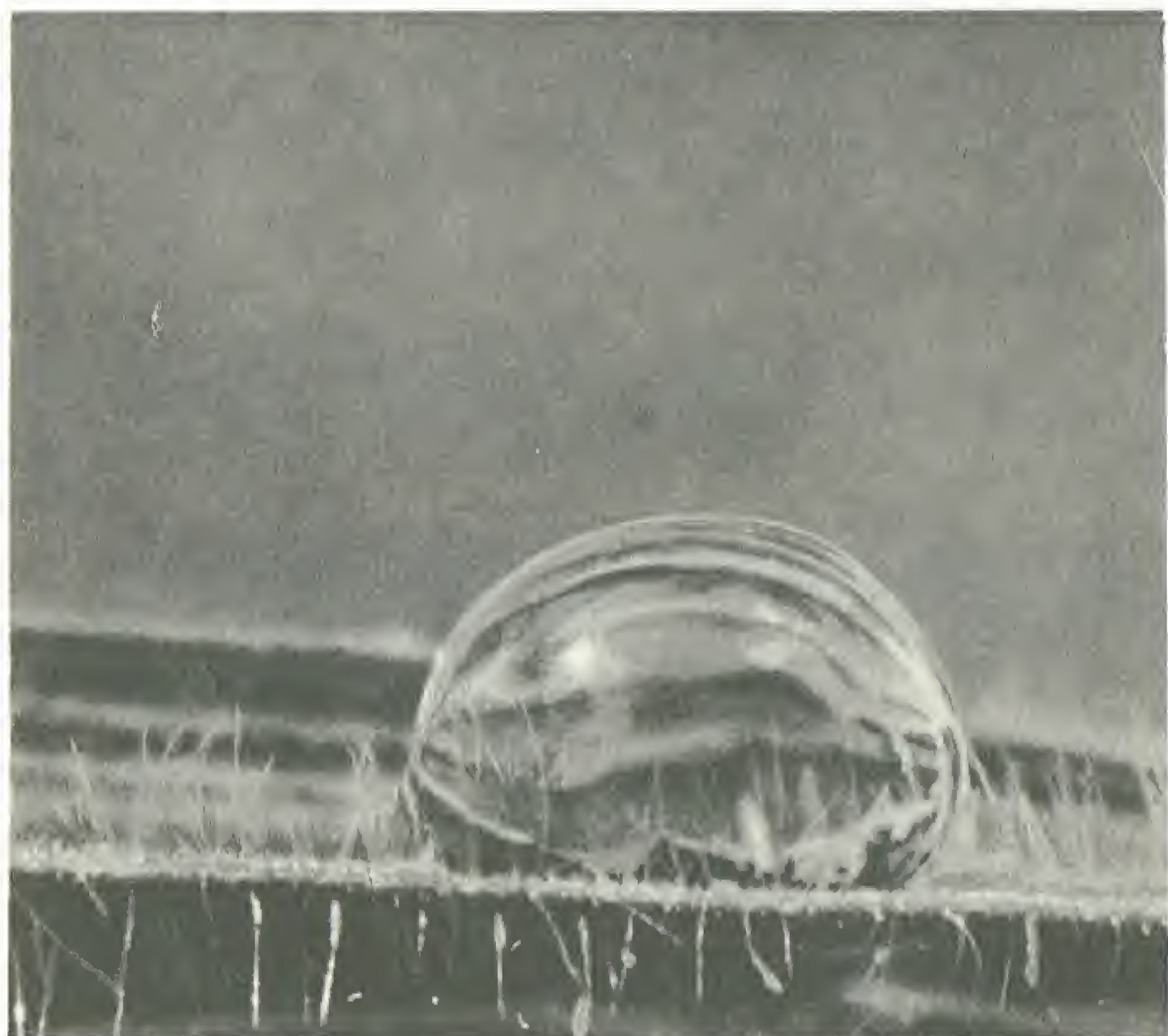
Las soluciones coloidales, como las que forma, por ejemplo, la gelatina al contacto del agua, pueden asimilarse a cuerpos porosos elásticos de poros extremadamente finos y, por consiguiente, pueden absorber el agua e inflarse, desarrollando presiones considerables.

Estalagmometría. — La gota que se forma en el extremo de un cuentagotas sólo se desprende cuando su peso excede a la fuerza capilar $2\pi R \cdot A$. Por consiguiente, a un número determinado de gotas corresponde un peso determinado de líquido.

Los cuentagotas medicinales, por ejemplo, tienen un radio R tal, que 20 gotas equivalen a un gramo de agua destilada.

Marcel LAPORTE y Alain TOUREN







Ejemplos de tensión superficial. *A la izquierda*: Gota de rocío colgante de una hoja de trébol. *A la derecha*: Gota de rocío en la sección plana de una hierba. *Abajo*: Gota de agua en reposo sobre una superficie plana *(Fot. X.)*

Estática de los gases

Presión atmosférica
Barómetros

Reseña histórica. Presión de los gases. Presión atmosférica. Experiencia de Torricelli (1643). Experiencia del revienta vejigas. Experiencia de la pipeta. Peso del litro de aire. Principio de Arquímedes. — **Medida de las presiones. Barómetros:** Barómetro normal. Correcciones. Barómetros metálicos. Barómetros de inscripción. Previsión del tiempo. Nivelación barométrica. Altura de la atmósfera

Reseña histórica. — **Newton** fue el primero que intentó demostrar que el aire pesa, comprimiéndole en una esfera hueca (1638). **Torricelli**, estudiando de nuevo una cuestión planteada a su maestro **Galileo** sobre las bombas que no pueden aspirar agua a más de 32 pies de altura, pensó que un líquido más pesado se elevaría todavía menos; llenando con mercurio un tubo largo por uno de sus extremos, y tapando el otro extremo del tubo con el dedo, lo introdujo en el mercurio, y observó que el nivel del mercurio descendía desde el extremo del tubo de vidrio y se detenía a una altura de 23 pulgadas y media, altura que estaba con respecto a la del agua (32 pies), en razón inversa de las densidades del mercurio y del agua (1643). **Pascal** repitió estas experiencias con tubos de diversas formas y con distintos líquidos y observó que, para secciones iguales, la altura de estos líquidos representaba el mismo peso (1647). Torricelli atribuyó estos efectos a la gravedad. Pascal decidió repetir la experiencia de Torricelli en la cima y en la base de una montaña, simultáneamente. El 19 de septiembre de 1648, Périer, cuñado de Pascal, hizo esta célebre experiencia en el Puy de Dôme, repitiéndola Pascal, a su vez, en la Tour Saint-Jacques. Todos los físicos construyeron tubos de Torricelli: se había descubierto el barómetro.

El *barómetro de cuadrante* se debe a **Hooke** (1665).

Presión de los gases. — Para explicar la *dilatabilidad* de los gases, es decir, su propiedad de ocupar todo el volumen que los contiene, por muy grande que éste sea, condujo a admitir que están constituidos por partículas independientes, denominadas *moléculas*, en estado de agitación permanente. Toda pared sólida sumergida en un gas queda entonces sometida a los choques múltiples de las moléculas; estos choques, análogos a los de un chorro de arena, ejercen sobre cada elemento de la pared sólida una fuerza Δf perpendicular a esta pared y proporcional a su dimensión, de forma que puede escribirse

$$(1) \qquad \frac{\Delta f}{\Delta S} = C \cdot p;$$

el valor numérico de la constante C depende de las unidades escogidas para medir la fuerza y la superficie. El valor de p sólo depende del número de partículas que chocan en la superficie por unidad de tiempo, de sus masas y de sus velocidades.

Esta constante p, que mide la fuerza por unidad de superficie, es, por definición, la *presión* del gas sobre el elemento de pared.

La unidad de presión puede escogerse de forma que C sea igual a la unidad, para lo cual basta tomar como unidad de presión la que ejerce la unidad de fuerza sobre la unidad de superficie; entonces, para $\Delta f = 1$ y $\Delta S = 1$, la presión es igual a la unidad de presión, es decir, $p = 1$, lo que implica en la ecuación (1) $C = 1$.

Presión atmosférica. — En particular, el aire atmosférico ejerce sobre toda pared sólida en la que se encuentre sumergido, una presión perpendicular a dicha pared, que se denomina presión atmosférica y cuyo valor, como vamos a ver, es del orden de un kilogramo por centímetro cuadrado.

Experiencia de Torricelli (1643). — Numerosas experiencias permiten poner de manifiesto la existencia de esta presión y, eventualmente, medirla. Así sucede con la experiencia hecha por Torricelli, discípulo de Galileo, en el siglo XVII.

Para repetir esta experiencia se llena completamente con mercurio un tubo de vidrio de un metro de longitud aproximadamente (*fig.* 80); se deja libre el extremo abierto D y después de haberlo invertido, se le introduce en una cuba, llena también de mercurio; se observa entonces cómo el mercurio se separa del extremo A, pero se mantiene a un nivel N, cuya altura vertical sobre la superficie libre del mercurio en la cuba depende del lugar y del momento de la experiencia, aunque permanece siempre próxima a 76 centímetros en nuestras latitudes y a proximidad del nivel del mar.

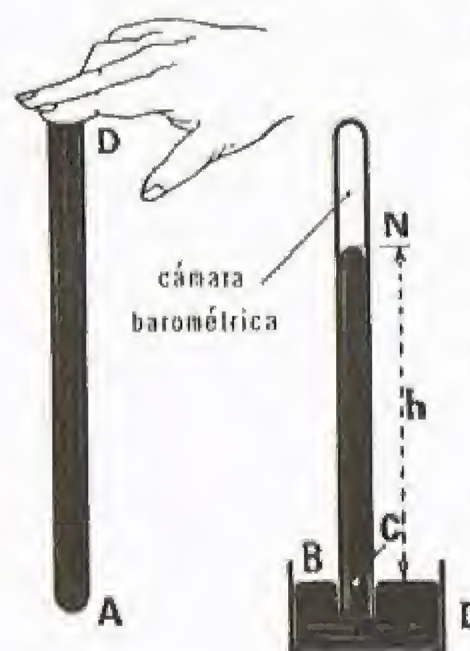


Fig. 80

Esta experiencia demuestra la existencia de la presión atmosférica y proporciona su medida. En efecto, cuando el nivel se fija en N, el mercurio está en reposo, lo que exige, de acuerdo con el principio fundamental de la hidrostática, que las presiones sean las mismas en todos los puntos de un mismo plano horizontal.

Expresemos que las presiones que soporta el mercurio son las mismas en B y en C. La presión en C, p_C, es igual a la presión que ejerce la columna de mercurio de altura h; esta presión (v. HIDROSTÁTICA, pág. 19) es igual al peso de una columna de mercurio de altura h y cuya sección es la unidad de superficie. El espacio situado encima de N está vacío (cámara barométrica), o, en todo caso, sólo contiene vapor de mercurio, cuya presión a la temperatura ordinaria es sumamente pequeña; para el equilibrio, es necesario que la presión que soporte el mercurio en cualquier punto D de la superficie libre sea la misma que en C; ahora bien, la presión en B sólo puede deberse al aire atmosférico y, por consiguiente, este aire ejerce una presión que llamaremos H; se tendrá, pues, $H = p_B = p_C$.

Se denomina "atmósfera normal" a la presión que corresponde a una altura de 76 centímetros de mercurio normal, cuya masa específica es 13,6 g/cm^3.

Calculemos la atmósfera normal H_o, en g/cm^2; se tendrá

$$H_o = 76 \times 13{,}6 = 1\,033 \text{ g/cm}^2,$$

o sea, algo más de 1 kg/cm^2.

Para calcular en barías, basta recordar que un gramo-peso vale g dinas:

$$H_o = 1\,033 \times 980{,}665 = 1\,013\,615 \text{ barías.}$$

La atmósfera normal vale, por consiguiente, algo más de un millón de barías, es decir, una megabaría. A veces se toma como unidad de presión el millón de barías, denominado *bar*. La milésima de bar, o *millibar*, se emplea prácticamente en meteorología: mil milibars son, aproximadamente, la presión atmosférica normal.

OBSERVACIÓN. La presión atmosférica se ejerce normalmente sobre toda superficie, cualquiera que sea su orientación, como lo demuestran numerosas experiencias: la antigua del revienta vejigas, por ejemplo.

Experiencia del revienta vejigas. — Un recipiente de vidrio en el cual se puede hacer el vacío (*fig.* 81) se cierra herméticamente con una piel de vejiga. Haciendo el vacío por medio de una bomba, se comprueba cómo se curva la vejiga hacia el interior del vaso, hasta que estalla; esta experiencia se consigue cualquiera que sea la inclinación de la superficie.



Fig. 81

Experiencia de la pipeta. — La existencia de la presión atmosférica permite explicar numerosas experiencias que a primera vista podrían parecer bastante paradójicas, como la experiencia clásica de la pipeta.

La pipeta tiene un tubo de vidrio dilatado en su parte media. Si se sumerge el extremo A (*figura* 82) en un líquido, y por el otro extremo se aspira el aire que contiene la pipeta, se ve cómo el líquido asciende, a causa de la diferencia entre las presiones en M y N; si se tapona entonces rápidamente este extremo de forma que se evite la entrada de aire en la pipeta, se la puede retirar y transportar sin que se vierta líquido por el extremo abierto A; puede suponerse que los choques de las moléculas de aire que golpean de abajo arriba la superficie del líquido impiden que caigan moléculas de dicho líquido.



Fig. 82

OBSERVACIÓN. En un instante y en un lugar dados, donde la aceleración de la gravedad sea g cm/s^2, la altura h_1 de un líquido de peso específico μ_1 (g/cm^3) que produce en el vacío la presión atmosférica H (barías) es tal, que

$$H = h_1 \mu_1 g;$$

la altura a que ascendería otro líquido de peso específico μ_2 sería h_2, de forma que

$$H = h_2 \mu_2 g.$$

De estas ecuaciones se deduce que $h_1 \mu_1 = h_2 \mu_2$, o bien $\frac{h_2}{h_1} = \frac{\mu_1}{\mu_2}$, es decir, que "las alturas de los líquidos están en razón inversa de sus pesos específicos".

Pascal había comprobado ya este resultado en el siglo XVIII. Si la presión es de 76 cm de mercurio normal, la altura de la columna de agua podría alcanzar 1 033 cm, o sea 10,33 m.

Peso del litro de aire. — Un globo no tiene el mismo peso cuando se le pesa vacío que cuando está lleno de aire, lo que demuestra

que el aire es un fluido pesado; la diferencia de peso es el peso del aire que contiene el globo. El peso de un litro de aire depende de las condiciones de temperatura y de presión, siendo de 1,293 g a 0° y a la presión normal de 76 cm de mercurio.

Como los gases pesan, las leyes de la hidrostática se aplican a los gases en equilibrio y, en particular, al aire, y puede concluirse que la diferencia de las presiones entre dos puntos de un gas es igual al peso de la columna de gas cuya sección sea la unidad de superficie y cuya altura sea la diferencia de niveles.

Con arreglo a este criterio, la presión atmosférica debe decrecer cuando aumenta la altura; también fue demostrado por Pascal (v. página 26).

Hay que tener en cuenta el hecho de que los gases son mucho más ligeros que los líquidos y de que son muy compresibles, es decir, que su peso específico varía mucho con su presión (v. LEY DE BOYLE-MARIOTTE, pág. 28).

Principio de Arquímedes. — El principio de Arquímedes puede aplicarse a los gases; la resultante de las fuerzas de presión que ejerce el gas sobre un cuerpo en él sumergido es igual al peso del gas desplazado. Puede ponerse de manifiesto por la experiencia del "baroscopio", debida a Otto de Guericke: en los extremos de la cruz de una balanza se suspenden (*fig.* 83) una esfera hueca S, de varios centímetros de radio, y una tara maciza, de poco volumen, escogida de forma que equilibre la esfera en el aire, en las condiciones normales de temperatura y de presión.

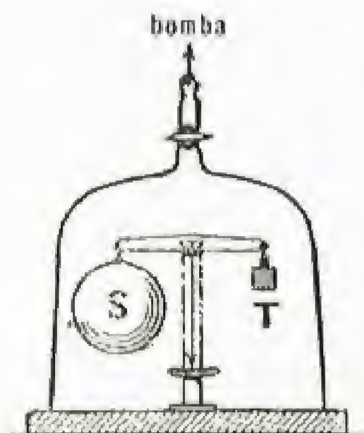


Fig. 83

Si se coloca el baroscopio dentro de una campana en la que se ha hecho el vacío, el equilibrio se altera a favor de la esfera, porque el peso del aire desplazado, es decir, el empuje de Arquímedes, disminuye a medida que disminuye la presión del gas y, por consiguiente, su peso específico. Inversamente, si se deja que entre en la campana un gas cuya densidad sea mayor que la del aire, el equilibrio se altera en favor de la tara. El baroscopio se emplea corrientemente en la industria para medir rápidamente la densidad de un gas del que se disponen grandes cantidades.

APLICACIONES. El empuje de Arquímedes en el aire se utiliza para las aeronaves, que están constituidas por envolturas de poco peso y gran volumen llenas de un gas ligero: por ejemplo, de hidrógeno o de helio.

Si P es su peso y F el empuje de Arquímedes, estarán sometidas a una fuerza F — P vertical dirigida hacia arriba, que se denomina "fuerza ascensional" (ejemplos: globos cautivos, dirigibles, globos sondas).

Medida de las presiones. Barómetros

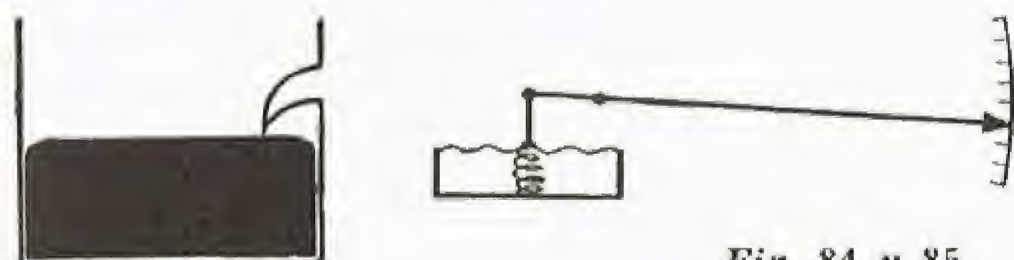
Barómetro normal. — El barómetro normal es, en principio, un tubo de Torricelli; para las medidas de precisión es necesario tomar cierto número de precauciones:

1° *Pureza del mercurio.* Se emplea mercurio lavado con ácido nítrico diluido, que disuelve en forma de nitratos las impurezas metálicas amalgamadas con el mercurio. Para este lavado se hace que el mercurio atraviese un embudo con tubo capilar en gotas finas dentro de un tubo largo que contiene la solución diluida de ácido. Este mercurio se seca a continuación (por ejemplo, sobre cal viva), se filtra y se destila a baja presión;

2° Se toma como *tubo barométrico* un tubo de vidrio cuyo diámetro sea suficiente para evitar los efectos de capilaridad (25 a 30 mm de diámetro); este tubo se lava con una mezcla sulfocrómica (ácido sulfúrico concentrado y bicromato de potasio), que oxida y destruye todas las materias orgánicas (grasas, polvos), se vuelve a lavar con agua destilada y se seca en una estufa de vacío.

Un extremo del tubo así preparado se sumerge en la "cuba barométrica" de vidrio o de hierro que contiene el mercurio limpio; por el otro extremo —unido a una bomba en la que se ha conseguido un vacío elevado— se hace el vacío, calentándolo a la vez, con precaución, con un soplete, de forma que los vapores de mercurio expulsen los últimos vestigios de aire; se cierra después el tubo por medio del soplete y se le separa de la bomba.

3° Para las medidas de precisión, es importante determinar con exactitud la *diferencia de niveles* entre la superficie libre del mercurio en la cuba y la superficie libre del mercurio en el tubo, para lo cual se emplea un catetómetro (v. p. 6).


Fig. 84 *y* 85

Para determinar el nivel de mercurio de la cubeta, que sería difícil de apreciar directamente, se recurre a diversos artificios; en general, se coloca una punta de vidrio o de metal sobre la superficie libre de mercurio (*fig.* 84) y por medio del anteojo del catetómetro se observan la punta y la imagen que de la misma da la superficie del mercurio.

Correcciones. — La altura h que se lee en la regla del catetómetro debe ser eventualmente corregida si se tiene en cuenta la dilatación de la regla en función de la temperatura. Si h' es la altura real, se tendrá $h' = h\ (1 + \lambda\ t)$, donde λ es el coeficiente de dilatación lineal de la regla.

Después es necesario expresar el resultado en altura del mercurio a 0° C o mercurio normal, al nivel del mar y a la latitud 45°, que correspondería a la misma presión que la altura h' de mercurio a $t°$ en un lugar donde la aceleración de la gravedad valdría g. Sea h_0 la altura del mercurio normal, μ_0 y μ_t las masas específicas del mercurio a 0° y a $t°$, y g_0 la aceleración de la gravedad al nivel del mar y a 45° de latitud; se tendrá

$h_0 \times \mu_0 \times g_0 = h' \times \mu_t \times g,$ siendo $\mu_0 = \mu_t\ (1 + mt),$

m es el coeficiente de dilatación cúbica del mercurio; $m = 180 \cdot 10^{-6}$

$$h_0 = h' \frac{1}{1 + mt} \frac{g}{g_0}, \qquad h_0 = h \frac{1 + \lambda t}{1 + mt} \frac{g}{g_0}.$$

Barómetros metálicos. — Los barómetros de mercurio son los únicos que se utilizan para las medidas de precisión, aunque presentan el inconveniente de ser pesados, frágiles y aparatosos.

Para las medidas corrientes se han construido barómetros portátiles de poco volumen: el modelo más corriente es el "barómetro aneroide" de Vidie (mecánico francés, 1844).

Un barómetro aneroide consiste, esencialmente, en una caja metálica plana en la que se ha hecho el vacío; la pared superior de esta caja es delgada y presenta unos canales circulares que le permiten deformarse bajo la acción de la presión atmosférica (*fig.* 85).

Las deformaciones son débiles y tienen que amplificarse, para lo cual se utiliza una amplificación por palanca; hacen que se desplace una aguja sobre un cuadrante, que se gradúa por comparación con un barómetro de mercurio; como la elasticidad del metal puede variar, es necesario comprobar las indicaciones de vez en cuando.

En las cajas debe hacerse el vacío cuidadosamente para evitar que las variaciones de temperatura produzcan deformaciones por dilatación del gas interior.

Barómetros de inscripción. — Pueden superponerse varias cajas análogas con objeto de que se sumen las deformaciones; la aguja móvil puede llevar un estilete con tinta que inscribe su posición en un cilindro animado de un movimiento de rotación uniforme por medio de un mecanismo de relojería; de esta forma se inscriben las variaciones de la presión atmosférica en función del tiempo (*fig.* 86).

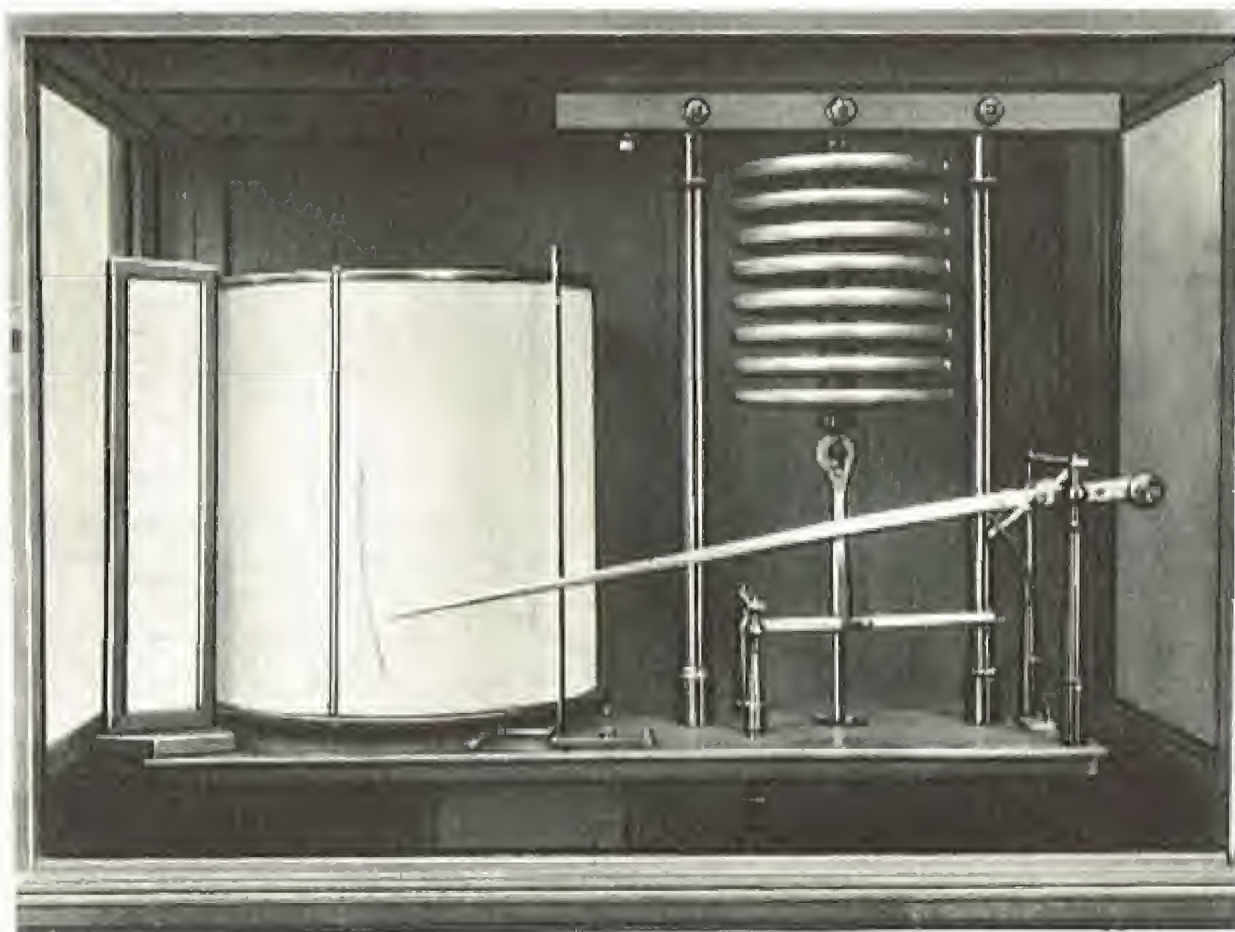
Previsión del tiempo. — Cuando la presión atmosférica se mide simultáneamente en varias estaciones distribuidas en un territorio extenso, pueden obtenerse pronósticos sobre la dirección y la velocidad de los vientos que se dirigen desde las regiones donde la presión es elevada a las regiones de más bajas presiones.

Nivelación barométrica. Altura de la atmósfera. — Haciendo observaciones barométricas en dos estaciones pueden deducirse sus diferencias de nivel, ya que la presión atmosférica disminuye al aumentar la altura. Esto se denomina nivelación barométrica. Se aplica una fórmula debida a Laplace:

$$Z = 18\,405 \text{ m } (1 + 0{,}0026 \cos 2\lambda) \left[1 + \frac{2\,t + t'}{1\,000} \right] \log \frac{H}{H'}.$$

H y H' son las alturas barométricas en la estación de más altura y en la otra, respectivamente; t y t' son las temperaturas de estas estaciones, λ la latitud y Z la diferencia de altura buscada.

Esta fórmula sirve, con buen tiempo, para medir la altura de una montaña. Se coloca un observador en la cima y el otro al pie de la montaña, y a una hora convenida observan simultáneamente la presión y la temperatura.


Fig. 86.—Barómetro metálico de inscripción (el estilete se desplaza 5 mm por 1 mm de diferencia de altura de mercurio) [Conservatorio de Artes y Oficios de París]

Compresibilidad de los gases: Ley de Boyle-Mariotte

Reseña histórica. Compresibilidad de los gases. Estudio experimental. Ley de Boyle-Mariotte. Validez de la ley de Boyle-Mariotte. Mezcla de gases por difusión. Ley de Dalton o de las mezclas de gases. Difusión a través de paredes porosas

Reseña histórica. — **Mariotte** trató de determinar la relación que existe entre el volumen del aire y su presión, publicando en 1676 los resultados de sus experiencias. En la misma época, **Boyle** había llegado en Inglaterra a las mismas conclusiones.

Compresibilidad de los gases. — Si se introduce un volumen de cualquier gas debajo de un émbolo situado en el interior de un cilindro, y se acciona dicho émbolo, el volumen del gas disminuye, aumentando su presión.

Estudio experimental. Ley de Boyle-Mariotte. — Se toman dos recipientes de vidrio verticales A y B, reunidos por un tubo de goma y que contienen mercurio (*fig.* 87). El recipiente B comunica directamente con la atmósfera, y el recipiente A, cerrado por un grifo *r*, contiene encima del mercurio cierto volumen de aire, y está graduado. El conjunto está sostenido por un soporte, pudiendo elevarse o descenderse B a voluntad. Una escala graduada vertical indica la diferencia entre los niveles del mercurio en A y B. Como estos niveles están

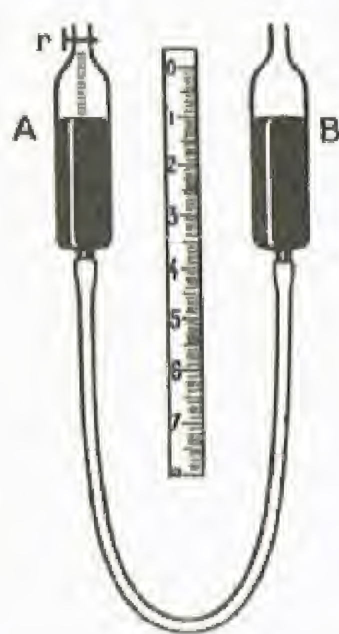


Fig. 87

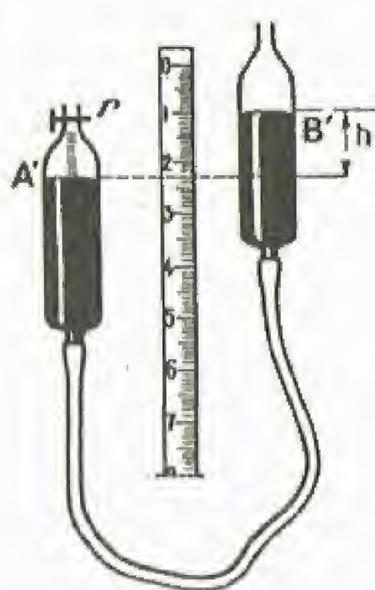


Fig. 88

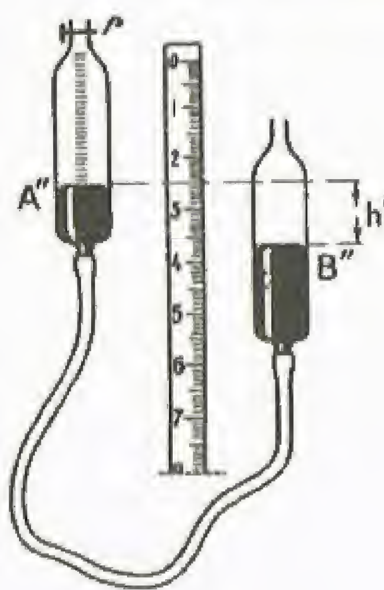


Fig. 89

situados en el mismo plano horizontal, la presión del gas de A es igual a la presión atmosférica. Si se eleva B (*fig.* 88), se ve cómo disminuye el volumen del gas de A al mismo tiempo que el mercurio se eleva en B' una altura *h* por encima de A'. La presión del volumen del gas es entonces $H + h = p$. Si se desciende B hasta B'' (*fig.* 89), el volumen del gas A aumenta, y la diferencia del nivel del mercurio entre B'' y A'' es *h*; la presión del volumen del gas es entonces $H - h' = p'$.

Boyle y Mariotte comprobaron que

$$pv = p'v'$$

y establecieron la siguiente ley:

A temperatura constante, el producto del número que mide la presión de una masa dada de gas por el número que mide su volumen es constante, cualquiera que sea la presión.

Teniendo en cuenta que

$$\frac{v}{v'} = \frac{p'}{p},$$

puede enunciarse este principio en la forma siguiente: *A temperatura constante, el volumen y la presión de un gas son inversamente proporcionales.*

Sea D la masa específica de un gas de masa *m* a la presión *p*, y D' su masa específica a la presión *p'*. Se tendrá:

$$D = \frac{m}{v}, \qquad D' = \frac{m}{v'};$$

de donde

$$\frac{D'}{D} = \frac{v}{v'} = \frac{p'}{p}.$$

A temperatura constante, la masa específica de un gas es proporcional a su presión.

Validez de la ley de Boyle-Mariotte. — La ley de Boyle-Mariotte es sólo aproximada; esta aproximación es suficiente para los gases a temperaturas alejadas de su punto crítico y a presiones no demasiado intensas. Un estudio detenido revela que el producto *pv* aumenta, para ciertos gases, con la presión, mientras que para otros gases disminuye y después aumenta, cuando las presiones son intensas. Para una molécula-gramo de un gas, a presiones débiles, el producto *pv* tiende a un mismo límite para todos los gases (v. Ley de Avogadro, pág. 243).

La ley de Boyle-Mariotte representa, no obstante, para los gases que se licúan difícilmente (aire, hidrógeno, etc.), una buena aproximación a temperaturas ordinarias y a presiones medias.

Mezcla de gases por difusión. — Se denomina difusión de los gases la propiedad de poderlos mezclar íntimamente cuando se les pone en contacto, a causa de su expansibilidad.

Ley de Dalton o de las mezclas de gases. — *A temperatura constante, la presión de la mezcla de varios gases es igual a la suma de las presiones que tendrían dichos gases si cada uno ocupara el volumen total.*

Estas presiones se denominan "presiones parciales" de los diferentes gases.

Sean *v*, *v'* y *v''* los volúmenes iniciales de los diferentes gases y *p*, *p'* y *p''* sus presiones iniciales. Al mezclarlos en un vaso de volumen V, si la presión final total es P, las presiones parciales son

$$\frac{pv}{V}, \quad \frac{p'v'}{V}, \quad \frac{p''v''}{V}.$$

En virtud de la ley, se tendrá:

$$P = \frac{pv}{V} + \frac{p'v'}{V} + \frac{p''v''}{V}$$

o

$$PV = pv + p'v' + p''v''.$$

Debe señalarse que esta ley es, como la de Boyle-Mariotte, aproximada.

Difusión a través de paredes porosas. — Cuando dos gases se separan por una pared porosa, se difunden a través de esta pared, pero la experiencia muestra que las presiones a ambos lados de la pared no son iguales durante esta difusión, es decir, que ciertos gases se difunden más rápidamente que otros. Se denomina velocidad de difusión el cociente del volumen del gas difundido por el tiempo empleado en esta difusión. Graham ha demostrado que esta *velocidad de difusión* es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la densidad del gas.

Manómetros

Reseña histórica. Clasificación de los manómetros. Manómetro barométrico de líquido. Manómetro de aire libre. Manómetro metálico de Bourdon. Manómetro de inscripción. Medida de presiones muy bajas. Medida de presiones muy altas

Reseña histórica. — **Otto de Guericke** inventó, a mediados del siglo XVII, un instrumento llamado *manoscopio*, cuyo objeto era indicar las variaciones de densidad del aire; **Varignon** inventó el manómetro de líquido en 1705 y **Bourdon,** en 1849, el manómetro metálico.

Clasificación de los manómetros. — La escala de presiones es muy amplia, y va desde la millonésima de milímetro de mercurio, en los tubos electrónicos, a varios millares de atmósferas. A lo largo de esta escala no pueden utilizarse los mismos aparatos. Estudiaremos a continuación tres zonas, sin que puedan establecerse fronteras bien definidas:

las presiones cercanas a la presión atmosférica;
las presiones muy bajas;
las presiones muy altas.

En la primera zona indicaremos diversos aparatos de líquidos o metálicos.

Manómetro barométrico de líquido. — Este aparato es muy parecido al tubo de Torricelli, del que sólo difiere porque la cuba está cerrada y forma una caja que se pone en comunicación con el recipiente que contiene el gas cuya presión quiere medirse. La presión del gas está equilibrada por una altura *h* de mercurio, pudiendo leerse directamente esta presión (*fig.* 80).

Cuando *h* es pequeña, el tubo puede ser corto y tener la forma de una V.

Manómetro de aire libre. — El tubo con mercurio está abierto por su parte superior y, por consiguiente, la presión que soporta el mercurio es la presión atmosférica H. Cuando la diferencia de nivel del mercurio es *h*, la presión del gas es

$$p = H \pm h,$$

según que el mercurio se encuentre más alto o más bajo en la rama abierta del tubo (*fig.* 91).

Este aparato exige el conocimiento de la presión atmosférica en el momento de la medida, y por consiguiente, la presencia de un barómetro a proximidad del aparato, puesto que mide la diferencia entre la presión del gas y la presión atmosférica.

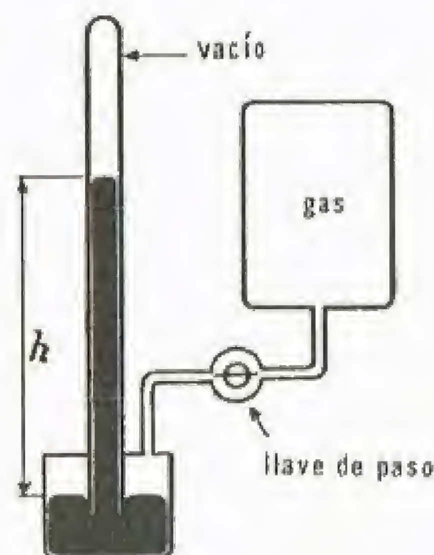


Fig. 90

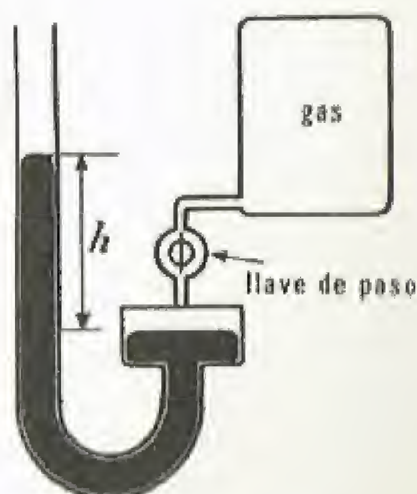


Fig. 91

Cuando esta diferencia es pequeña, se puede utilizar en lugar del mercurio, agua u otro líquido cuya masa específica sea mucho menor que la del mercurio. Con tal líquido, la misma diferencia de presión se traducirá por una desnivelación mayor, y el aparato será más sensible.

También puede inclinarse la rama abierta del tubo. Si esta rama forma un ángulo α con la vertical, la longitud de la desnivelación en este tubo quedará multiplicada por $\frac{1}{\cos \alpha}$; por consiguiente, se aumentará la sensibilidad aumentando el ángulo α.

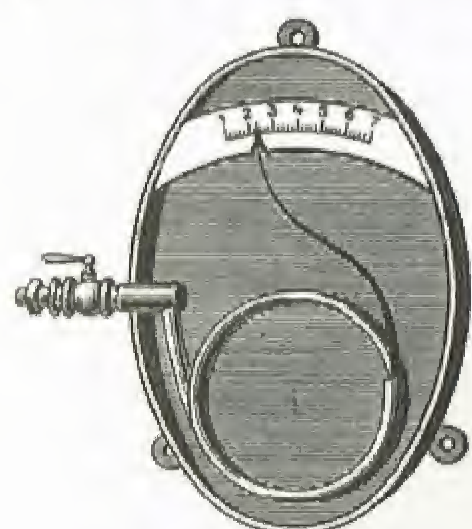


Fig. 92

Manómetro metálico de Bourdon. — Se compone de un tubo de acero de paredes delgadas y flexibles de sección elíptica, curvado en espiral (*fig.* 92). Cuando se le somete interiormente a la presión de un fluido, tiene tendencia a enderezarse, por ser la superficie de la pared exterior mayor que la de la otra pared.

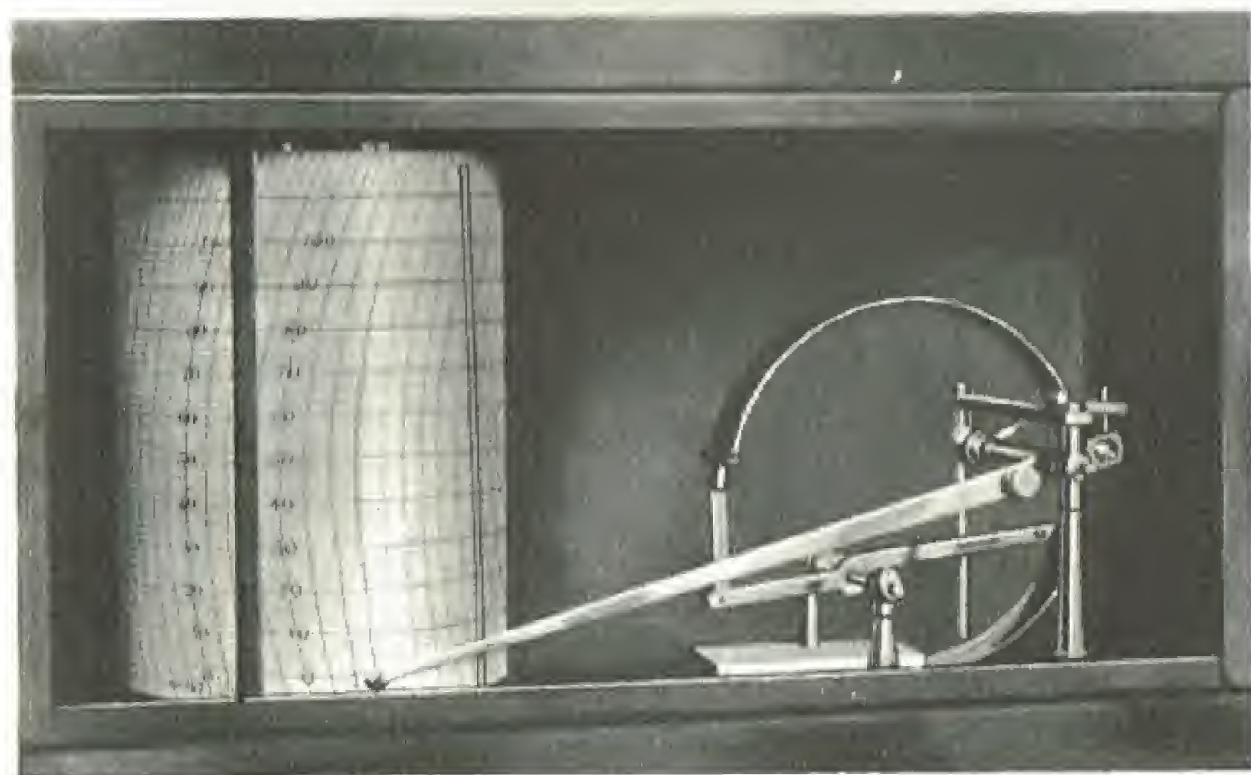


Fig. 93.—Manómetro de inscripción Richard

Si disminuye la presión, el tubo se vuelve sobre sí mismo, gracias a su elasticidad. Las deformaciones las indica una aguja móvil que se desplaza ante un cuadrante. El aparato se gradúa por comparación con un manómetro de aire libre.

Estos aparatos son instrumentos industriales sólidos y poco voluminosos, que desgraciadamente pierden progresivamente exactitud a causa de la variación de la elasticidad del metal, y entonces es necesario volver a graduarlos.

Manómetros de inscripción. — Los manómetros metálicos se transforman fácilmente en instrumentos de inscripción (*fig.* 93); para ello, se une la extremidad del tubo por medio de palancas amplificadoras a una aguja con una pluma móvil que se desplaza sobre un cilindro giratorio accionado por un movimiento de relojería. Estos aparatos son de gran utilidad, por las informaciones que permiten obtener, para cuidar las calderas de una máquina de vapor.

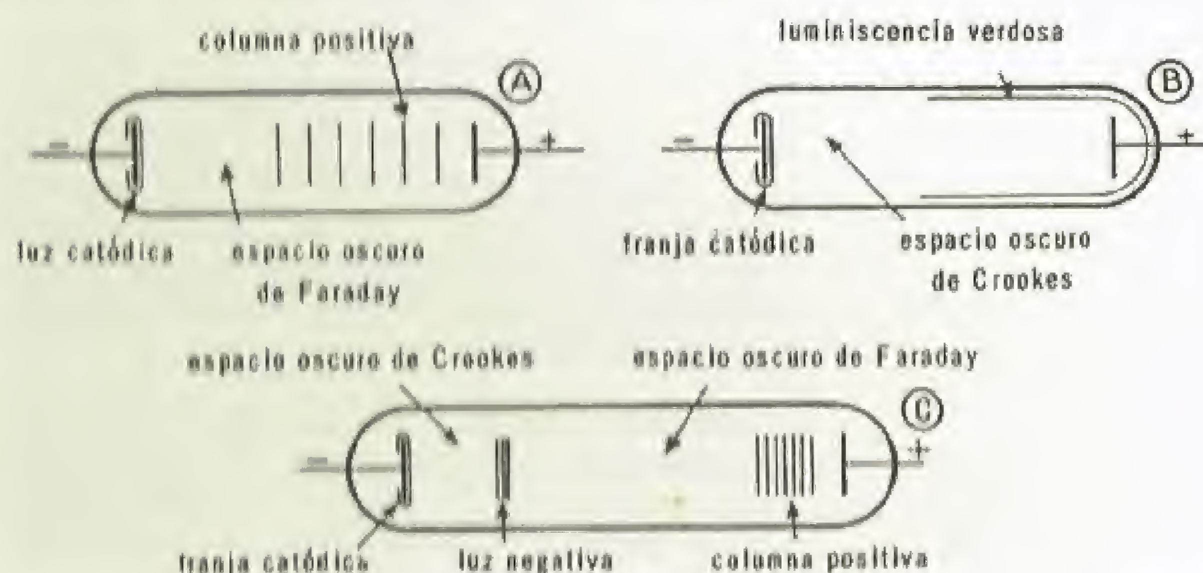


Fig. 94.—Medida de presiones muy débiles: A, del orden del mm de mercurio; B, del orden de 0,01 mm de mercurio; C, del orden de 0,1 mm de mercurio

Medida de presiones muy bajas. — Para medir las presiones bajas existen varios tipos de aparatos. El método utilizado más corrientemente consiste en observar el aspecto de la descarga eléctrica en el gas rarificado. La corriente la proporciona una bobina de inducción, y la descarga se produce entre dos electrodos situados en el gas (*fig.* 94). Se utiliza con frecuencia este método para comprobar el buen funcionamiento de las bombas que producen un vacío elevado.

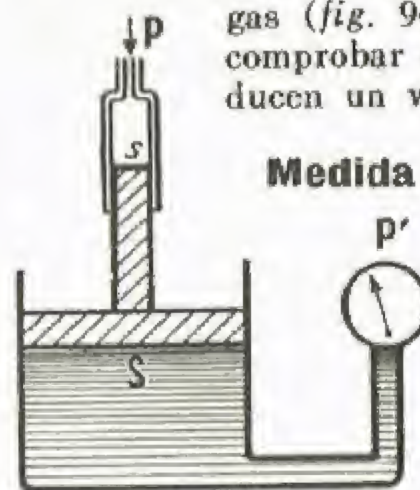


Fig. 95

Medida de presiones muy altas. — Para evitar el empleo de tubos de longitud excesiva, se transforman las altas presiones por medio de un doble émbolo (método de Amagat), en otras más bajas que les sean proporcionales, y se miden estas presiones más bajas por medio de manómetros de líquido o metálicos (*fig.* 95).

La presión que hay que medir P se ejerce sobre la pequeña superficie s del émbolo. Por consiguiente, éste estará sometido a una fuerza $F = Ps$, que transmite al líquido por su superficie grande S en forma de presión $P' = \frac{F}{S}$. La presión del líquido será pues $P' = P\frac{s}{S}$.

Esta presión quedará disminuida en la relación $\frac{s}{S}$ de las dos superficies del émbolo. Esta presión P′, que podrá ser 1 000 veces menor que P, si $\frac{S}{s} = 1\,000$, se mide por medio de un manómetro ordinario.

Bombas de gas y de vacío

Reseña histórica. Presión inicial y presión de evacuación. Presión límite. Velocidad de una bomba. Bombas preparatorias. Bombas de vacío elevado. Bombas moleculares. Bomba Holweck. Bombas de difusión o de condensación. Trompas de agua. Trompas de mercurio. Bombas de compresión. Presión límite

Reseña histórica. — Las experiencias de **Torricelli** y de **Pascal**, que pusieron de manifiesto que la naturaleza no tenía horror al vacío y que éste podía existir, no deberían tardar en originar el descubrimiento de la *máquina pneumática*. **Otto de Guericke** intentó construirla por aquella época y en 1650 construyó la primera máquina de obtención de vacío.

En 1654 efectuó su famosa experiencia de los *hemisferios de Magdeburgo*, con dos hemisferios huecos solidarios por haberse hecho el vacío en su interior; se necesitó la fuerza de dieciséis caballos para separarlos (v. la lámina fuera de texto).

Boyle perfeccionó la máquina neumática e inventó el *manómetro*, destinado a medir el peso del aire rarificado (1661).

Los perfeccionamientos de la técnica del vacío se deben a **Geissler** (1857), **Sprengel, Gaede, Langmuir** y **Holweck.**

DEFINICIÓN. *Se denominan* **bombas de gas** *los aparatos destinados a evacuar los gases contenidos en un recipiente y a producir el vacío dentro del mismo.*

Los elementos característicos de las bombas son los siguientes: presión inicial, presión límite y velocidad de evacuación.

Presión inicial y presión de evacuación. — Ciertos modelos de bombas pueden servir para evacuar el gas contenido en un recinto a partir de una presión elevada, principalmente a partir de la presión atmosférica. Estas bombas pueden también servir para enviar el gas aspirado a la atmósfera o, eventualmente, para permitir que se le recoja.

Ninguna de las bombas de esta categoría permite la obtención de un vacío muy elevado, superior, por ejemplo, a 1/1 000 de milímetro de mercurio; para alcanzar presiones más bajas es necesario emplear

otros modelos que no pueden extraer los gases ni inyectarlos más que en los recipientes donde ya existe una presión bastante baja, inferior, por ejemplo, al centímetro de mercurio.

En el caso en que se desee vaciar al máximo un recipiente, como cuando se trata, por ejemplo, de las lámparas utilizadas en electrónica, de los tubos de rayos X de cátodo caliente, de los tubos de gases luminiscentes, que es necesario vaciar previamente y por completo del aire que contienen, deberá utilizarse una bomba de cada categoría.

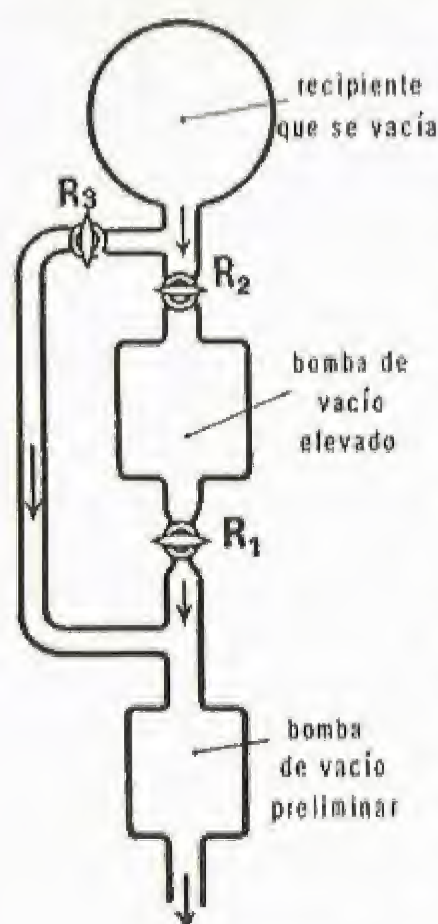


Fig. 96

La bomba de la primera categoría comenzará a reducir la presión; se llama "bomba preliminar"; otra bomba de la segunda categoría, "bomba de difusión o bomba molecular", acabará de vaciar el recipiente.

Las dos bombas deberán montarse como indica el esquema (*fig.* 96). Una vez abiertas las llaves R_1, R_2 y R_3, se pone en marcha la bomba preliminar, que aspira el gas en la bomba de vacío elevado y en el recipiente que hay que vaciar; cuando la presión se ha reducido suficientemente, se cierra la llave R_3 y se pone en marcha la bomba de vacío elevado, que aspira los gases del recipiente y los envía a la bomba preparatoria; ésta, a su vez, los expulsa a la atmósfera.

Presión límite. — Se designa así la presión más baja que una bomba puede obtener en el interior de un recipiente. Estas presiones se miden en columnas de mercurio o en barías.

Si las presiones se calculan en columnas de mercurio, es necesario, para ser precisos, especificar la temperatura de la que depende la masa específica μ del mercurio (masa específica del mercurio a 0°, $\mu_0 = 13{,}596$) y el valor de la aceleración de la gravedad g en el lugar de la medida. Estos elementos son necesarios para calcular la presión en mercurio normal (mercurio a 0° y $g = 980{,}665$, a la latitud 45° y al nivel del mar).

La presión correspondiente a 1/1 000 de milímetros o micra de mercurio normal es de

$$1/10\,000 \times 13{,}596 \times 980{,}665 = 1{,}333 \text{ barías},$$

o, inversamente, una baría corresponde a 0,75 micra.

Las mejores bombas de vacío preliminar apenas sobrepasan la micra; las bombas de vacío elevado permiten alcanzar la milésima de micra o 10^{-6} mm de mercurio.

A estas presiones, el recorrido libre medio de las moléculas, es decir, la longitud media del camino que una molécula puede recorrer sin chocar con otra, llega a ser del orden de varios centímetros, es decir, del orden de magnitud de las dimensiones de las bombas y de las canalizaciones. A estas presiones tan bajas, las moléculas chocan principalmente con las paredes y, por consiguiente, las propiedades que se deben a los choques entre las propias moléculas (viscosidad) se atenúan.

Fig. 97

Se explica, pues, que los dispositivos de bombas que son necesarias para evacuar los gases "ultrarrarificados" sean diferentes de los que pueden utilizarse para un gas cuya presión sea tal que los recorridos libres de las moléculas sean muy pequeños con respecto a las dimensiones de los recintos que los contienen; de aquí que se empleen bombas de vacío elevado y bombas preparatorias, según los casos.

Velocidad de una bomba. — Consideremos una bomba en acción que vacía, a través de una canalización, un recipiente de volumen V; se puede medir la presión p que se ejerce en cada instante y trazar la curva $p = f(t)$, que representa las variaciones de la presión en función del tiempo; si esta bomba permite alcanzar una presión mínima límite pl, la curva presenta una asíntota de ordenada p_l (*fig.* 97). La presión disminuye dp del instante t al instante $t + dt$; como la disminución máxima de presión que puede obtenerse es igual a $p - p_l$, es interesante considerar la disminución "relativa" de presión $\dfrac{dp}{p - p_l}$: la velocidad con que se produce esta disminución relativa es $\dfrac{dp}{p - p_l} : dt$.

Si la bomba aspirara el gas en un recipiente de volumen unidad, la velocidad de la disminución relativa de presión sería V veces mayor, o sea

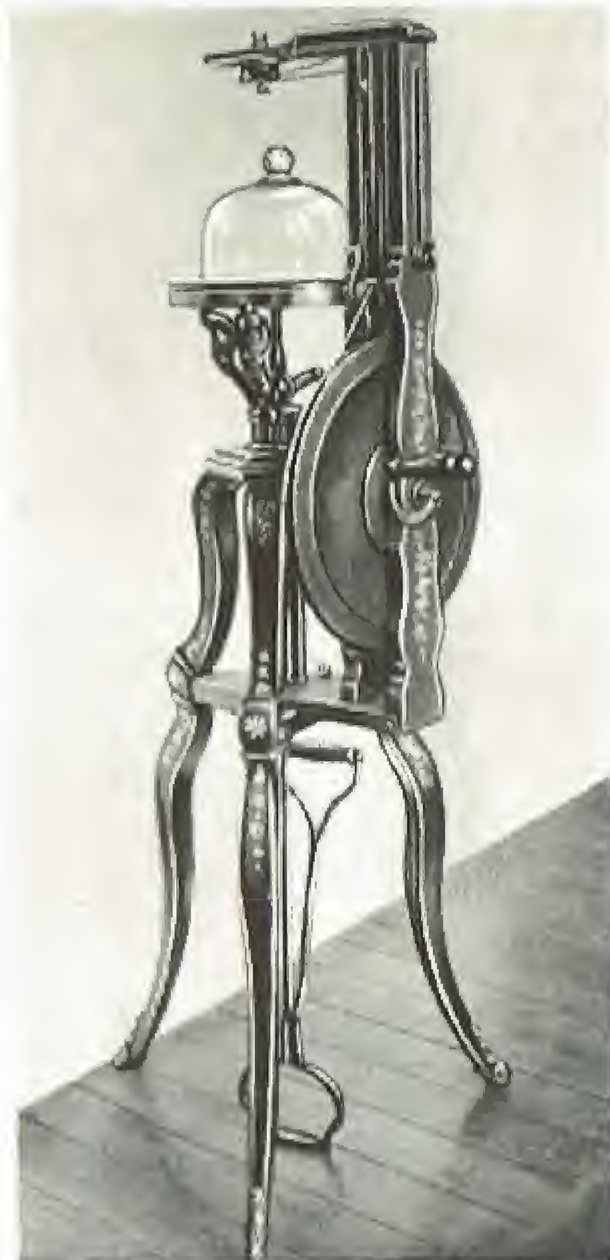
$$V \times \frac{dp}{p - p_l} : dt = V \times \frac{1}{p - p_l} \times \frac{dp}{dt}.$$

Una vez trazada la curva experimental $p = f(t)$, podrá determinarse el valor de esta expresión, en la que $\dfrac{dp}{dt}$ representa el coeficiente angular de la tangente, encontrándose que es constante, es decir, independiente de p; esta constante, cambiada de signo (porque dp es negativo) puede servir para caracterizar la velocidad de la bomba, que se define, por consiguiente, como "la velocidad de la disminución relativa de presión que produce en un recipiente de unidad de volumen".

Sería difícil trazar exactamente la tangente en un punto de la curva y, por consiguiente, determinar exactamente el coeficiente de $\dfrac{dp}{dt}$, del cual depende el valor de S, pero la relación

$$S = -V \times \frac{1}{p - p_l}\,\frac{dp}{dt}$$

da $\dfrac{dp}{p - p_l} = -\dfrac{S}{V}\,dt$, en la cual S es una constante; por integración se deduce: $S = V \times \dfrac{1}{t_2 - t_1} \times \text{Log}\,\dfrac{p_1 - p_l}{p_2 - p_l}$ (Log = logaritmo neperiano); para determinar S, bastará pues medir las presiones p_1 y p_2 obtenidas después de los tiempos t_1 y t_2 de bombeo y la presión límite p_l que podría alcanzarse con esta bomba en un recipiente de volumen determinado V. Esta velocidad depende, no sólo de la bomba, sino del diámetro y de la longitud de las canalizaciones que unen la bomba con el recipiente que se vacía.


Fig. 98.—Antigua máquina pneumática del Abate Nollet (Conservatorio de Artes y Oficios de París)

Estas velocidades se expresan en centímetros cúbicos por segundo o en litros por minuto; por ejemplo, la velocidad de una bomba de vacío elevado, entre una décima y una milésima de milímetro de mercurio, es de dos litros por segundo; esta bomba sólo tarda diez segundos en rebajar la presión de una décima a una milésima de milímetro en un recipiente de cinco litros.

Bombas preparatorias. — La antigua máquina neumática (*fig.* 98) no se utiliza ya; las bombas modernas son bombas rotatorias de baño de aceite, y existen numerosos modelos. Uno de los más sencillos es la bomba "Cenco", que consta esencialmente de un cilindro metálico estanco C sumergido en aceite; en él desemboca un canal de aspiración provisto de una abertura cerrada por una válvula *s*, que se levanta por una presión interior suficiente; una paleta P, empujada por un muelle *r*, se apoya sobre toda la longitud de un segundo cilindro C_1, excéntrico con respecto al eje O del cilindro C. El cilindro C se pone en movimiento de rotación, por medio de un motor eléctrico, alrededor del eje O.

La figura 99 representa dos posiciones del cilindro C_1: en la posición 1 se pone en comunicación un volumen v_1 con el recipiente que hay que vaciar; en la posición 2, una vez que el cilindro C_1 ha girado en el sentido de la flecha, la masa de gas que ocupaba el volumen v_1 pasa a ocupar el volumen v_2, que se hace cada vez menor a medida que gira C_1; cuando la presión de esta masa de gas llega a ser bastante grande, la válvula *s* se abre, saliendo el gas. Las bombas de este tipo permiten alcanzar una centésima e incluso una milésima de milímetro de mercurio.

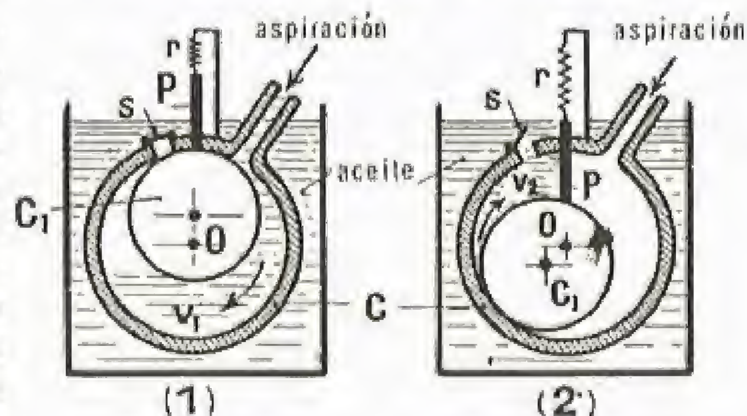


Fig. 99.—Bomba rotatoria de aceite

Bombas de vacío elevado. — Estas bombas son de dos tipos principales, basados en principios completamente diferentes: 1°, bombas moleculares; 2°, bombas de difusión o de condensación.

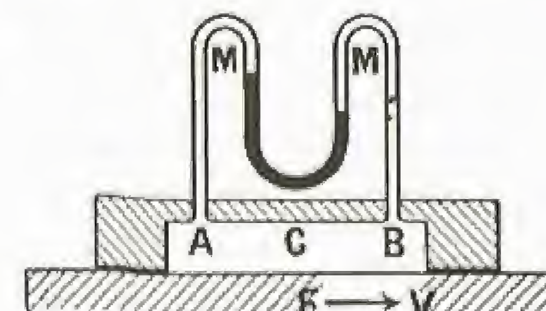


Fig. 100

Bombas moleculares. — Su principio es el siguiente: consideremos una cavidad (*fig.* 100) constituida por una especie de cajón invertido; imaginemos que el fondo F del cajón sea móvil y se desplace con una velocidad V, sin dejar de obturar continuamente e impenetrablemente la cavidad C. Puede comprobarse, por medio de un manómetro diferencial MM conectado entre A y B, que se produce en B un exceso de presión. Este hecho se explica suponiendo que cuando una molécula de gas choca con la pared móvil (tapiz giratorio) no rebota instantáneamente; durante el corto instante en que permanece

en contacto con la pared, adquiere cierta velocidad que la arrastra en el sentido del movimiento de esta pared.

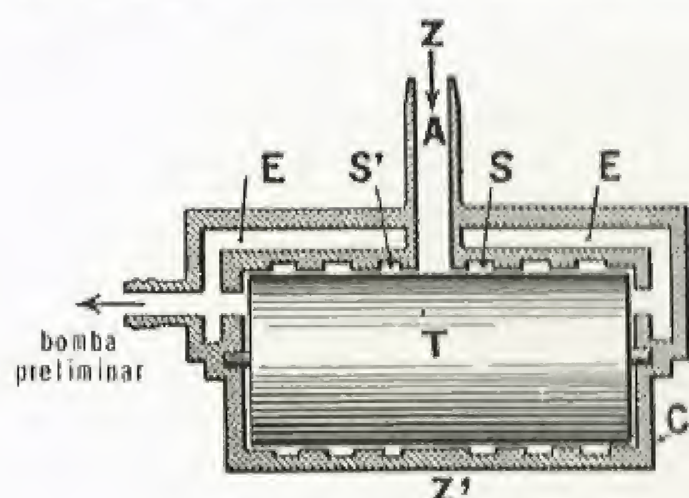


Fig. 101

Gaede fue quien primeramente construyó, en 1912, una bomba fundada en este principio. El dispositivo mecánico de Gaede fue muy simplificado por Holweck (1922), mejorándose al mismo tiempo la velocidad de la bomba y su presión límite.

Bomba Holweck. — La bomba Holweck (*fig.* 101) consta esencialmente de un cuerpo de bomba cilíndrica C, de bronce especial, estanco: en la cara interna de este cilindro se hacen dos surcos o canales helicoidales *s* y *s'*; estas dos hélices se arrollan en sentido contrario a partir del plano medio ZZ'. La profundidad de los canales helicoidales disminuye desde sus extremidades medianas a las extremidades laterales; estos canales se reúnen en su extremidad mediana en un canal ancho de aspiración A que comunica con el recipiente que se vacía; sus extremidades laterales se unen también en una canalización E, que comunica con la aspiración de la bomba preparatoria.

El arrastre de las moléculas se produce al girar rápidamente un tambor liso T, móvil alrededor del eje del cilindro C, rotación que se consigue mediante un dispositivo eléctrico que no se representa en la figura.

El juego que existe entre el cilindro y el tambor móvil es muy pequeño, tres centésimas de milímetro; cuando el tambor gira a 4 000 r.p.m., su velocidad periférica es de 35 m/s; las moléculas que recorren uno de los canales helicoidales adquieren, al chocar con el tambor, una componente de velocidad en el sentido del movimiento que les hace progresar y, en cierta forma, atornillarse a lo largo de la hélice, dirigiéndose hacia la bomba preparatoria, que las arrastra.

La presión inicial de estas bombas es de 4 cm de mercurio como máximo; la presión límite depende del vacío preliminar y de la canalización por la cual se aspiran los gases.

Bombas de difusión o de condensación. — La bomba de difusión fue inventada por Gaede en 1915 y perfeccionada por Langmuir (1916), que la denominó *bomba de condensación*. Para el funcionamiento de estas bombas se utilizan simultáneamente los fenómenos de difusión y de condensación.

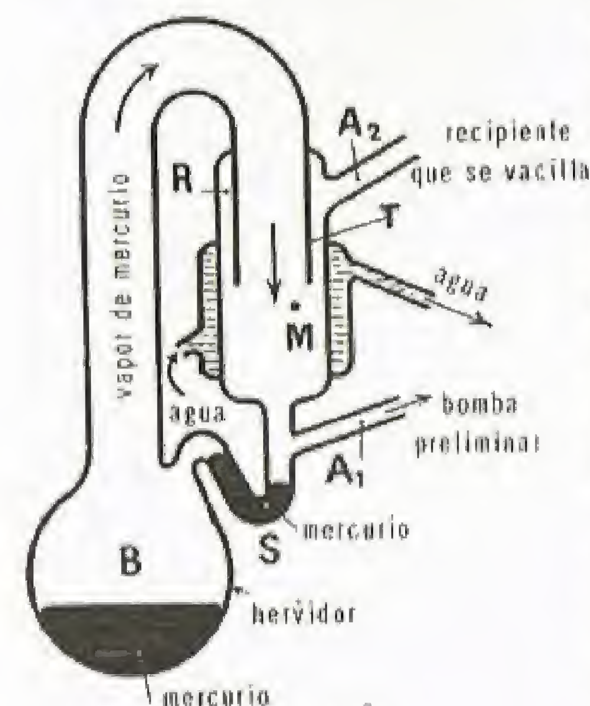


Fig. 102

El esquema siguiente (*fig.* 102) representa uno de los modelos más sencillos. En el hervidor D se coloca un líquido (mercurio, aceite), escogido de forma que la tensión máxima de su vapor a la temperatura ambiente sea muy baja, y se calienta hasta que hierva.

Una vez efectuado un buen vacío preliminar en la bomba A_1 y en el recipiente que hay que vaciar, que comunica con la bomba por el empalme A_2, se calienta el hervidor hasta que hierve el líquido; la ebullición se produce a una temperatura tanto más baja cuanto mayor sea el vacío preliminar (a 100° C, por ejemplo, en el caso del mercurio si el vacío preliminar es de 28/100 de milímetro).

Por el tubo T sale un chorro de vapor de mercurio; si la presión es bastante baja para que el recorrido libre medio de las moléculas de mercurio sea mayor que la distancia a la pared de condensación, estas moléculas podrán alcanzar directamente las paredes enfriadas por un manguito de circulación de agua y condensarse en él. Las moléculas del gas que se evacua, tales como M, que penetran por difusión en el chorro de las moléculas de mercurio, son arrastradas por ellas y van a acumularse en el estrechamiento de extracción A_1, y son eliminadas por la bomba preliminar. El mercurio que vuelve a caer en el sifón S separa el vacío bueno y el preliminar y vuelve a caer en el hervidor.

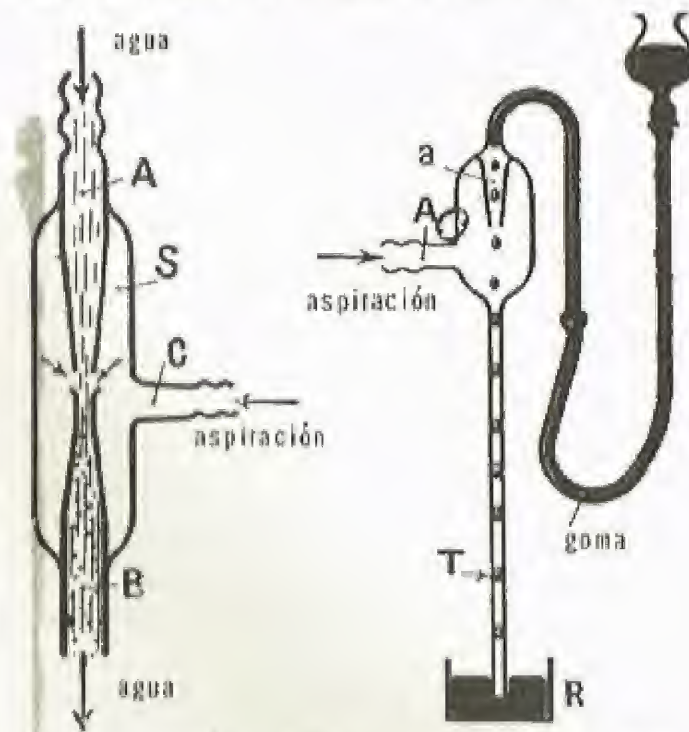


Fig. 103

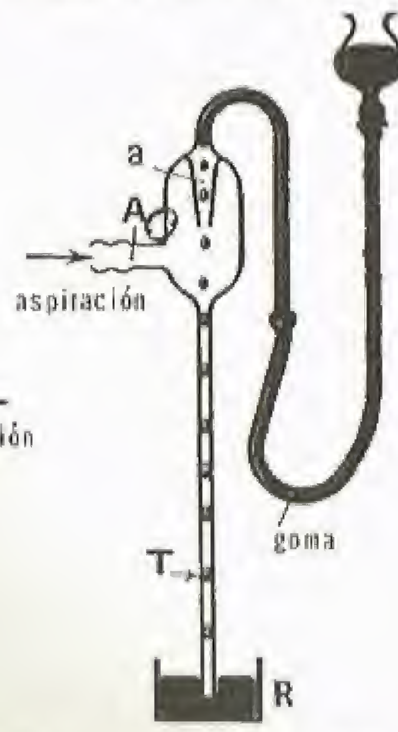


Fig. 104

La presión límite de estas bombas es del mismo orden de magnitud que la de las bombas moleculares; su gasto depende del caldeo, de las dimensiones geométricas de la bomba y de las canalizaciones; para los modelos recientes, se han señalado gastos de varios litros por segundo (v. lámina fuera de texto).

Trompas de agua. — Se llama trompa de agua al aparato destinado a aspirar el aire contenido en un recipiente; consta esencialmente de un cilindro S, de vidrio o de bronce, al que se adaptan tres tubos A, B y C. (*fig.* 103).

Por el tubo A llega agua a presión; a través del estrechamiento cónico, donde la corriente de agua adquiere una gran velocidad, pasa al tubo B. Las moléculas de gas que vienen a tocar la vena líquida son arrastradas por ella; la aspiración se hace por el tubo C que se pone en comunicación con el tubo que se vacía.

Con esta bomba no puede disminuirse la presión por debajo de la presión máxima de vapor de agua, a la temperatura de la experiencia, o sea, aproximadamente 15 milímetros de mercurio a 15° C. Las conexiones se hacen con tubos de caucho espeso, llamado caucho de vacío.

Trompas de mercurio. — La presión máxima del vapor de mercurio a la temperatura ordinaria es mucho menor que la del vapor de agua; las trompas de mercurio permiten obtener un buen vacío barométrico.

El aparato se representa en la figura 104; el mercurio cae a través del estrechamiento *a* en gotas finas, que forman un rosario discontinuo en el tubo capilar T, quedando aprisionado entre las gotas las moléculas de aire procedentes del recipiente que hay que vaciar; la aspiración se hace por el tubo A, que está unido a dicho recipiente. El mercurio se acumula en el recipiente R, del cual es necesario subirle al recipiente R'. Se obtienen vacíos muy satisfactorios, pero el funcionamiento es muy lento. Se han construido dispositivos que permiten que el mercurio ascienda automáticamente.

Bombas de compresión. — Se llaman así los aparatos destinados a comprimir un gas el aire en particular en un recipiente. Existen numerosos modelos de los que solamente indicaremos su esquema y principio de funcionamiento.

Una bomba de compresión consta esencialmente de un cuerpo de bomba cilíndrico, en el que se desplaza un émbolo móvil estanco (*fig.* 105). El fondo del cilindro lleva dos válvulas s_1 y s_2 que accionan respectivamente las tuberías de salida T_1 y de aspiración T_2. Sea V el volumen del depósito R en el que se quiere comprimir el aire, y v el volumen del cuerpo de bomba; supongamos que al principio de la experiencia se levanta el émbolo y que la presión del aire en el depósito y en el cuerpo de bomba sea igual a la presión atmosférica H.

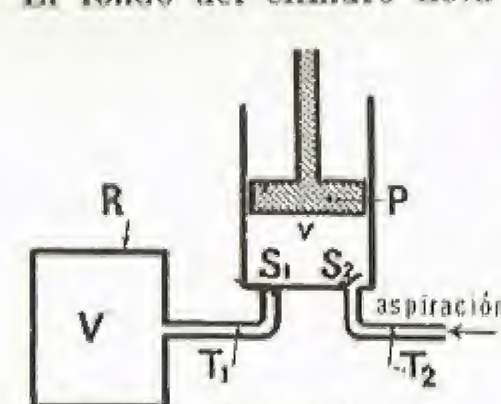


Fig. 105

Al descender el émbolo, la válvula s_2 se cierra, la s_1 se abre, y la masa m de aire que se encontraba en el cuerpo de bomba pasa al depósito en el cual va a aumentar la presión; sea p_1 la presión después de este primer descenso del émbolo; para determinar p_1 apliquemos la ley de Dalton de la mezcla de gases; en efecto, se opera a temperatura constante y se ha mezclado la masa m con la masa M de aire que se encontraba en el depósito.

Según la ley de Dalton, la presión p_1 es igual a la suma de las presiones que ejercerían las masas M y m si ocuparan por separado el volumen V; la masa M, en el volumen V, tenía la presión H; obtengamos la presión h que tendría la masa m, si ocupara ella sola el volumen V. Sabemos que esta masa m estaba a la presión atmosférica H al ocupar el volumen V. Aplicando la ley de Mariotte, se tendrá $h \cdot V = H \cdot v$,

de donde $$h = H \times \frac{v}{V},$$

y se tendra, pues, $$p_1 = H + h = H \left(1 + \frac{v}{V}\right);$$

puede repetirse el mismo razonamiento para cada recorrido del émbolo, y al cabo del enésimo recorrido, la presión será

$$p_n = H \left(1 + n \frac{v}{V}\right).$$

Presión límite. — La fórmula precedente podría llevar a la conclusión de que la presión puede aumentar indefinidamente al mismo tiempo que el número n de recorrido del émbolo; la experiencia muestra que se llega siempre a alcanzar una presión máxima que no puede sobrepasarse. Este resultado era fácil de prever, ya que el émbolo no ajusta exactamente con el fondo del cilindro, sino que siempre queda cierto espacio que corresponde al volumen u, denominado "volumen perjudicial", y cuya existencia limita el valor de la presión que la bomba es capaz de proporcionar.

Al funcionar la bomba, la válvula s_1 no empieza a abrirse más que cuando la presión en el cilindro llega a ser superior a la presión ya alcanzada en el depósito. Si subsiste un volumen u entre el émbolo, cuando está en el punto bajo de su recorrido, y el fondo del cilindro, la presión máxima p_l que puede tomar la masa del aire m que ocupaba el volumen v del cuerpo de bomba bajo la presión atmosférica H será: $p_l \times u = H \times v$.

Cuando se alcance esta presión p_l en el depósito, la válvula S_1 ya no se abrirá y no penetrará más aire en el depósito; esta presión p_l será, pues, un límite que no puede sobrepasarse. Se supone además, en lo anterior, que el émbolo se desplaza en el cilindro de forma perfectamente estanca y que las válvulas no tienen escapes ni se retrasan, lo que no se consigue en caso alguno.

Marcel LAPORTE y Alain TOUREN



El barco de vapor, una de las primeras aplicaciones prácticas de los motores térmicos.—Llegada de Londres, el 29 de marzo de 1816, del barco de vapor *Elisa*, capitán Andriel, que se representa saludando el palacio de las Tuilleries, de París (*Doc. del museo de la Marina de París*)

Termología

Reseña histórica. — La naturaleza del calor originó numerosas disgresiones de los pensadores griegos; **Heráclito** (576-480 antes de J. C.) lo consideraba como la fuerza causa de todas las transformaciones; **Demócrito** (nacido en 460 antes de J. C., como una materia que emanaba de los cuerpos calientes, y formada por átomos redondos muy móviles; **Aristóteles,** como una calidad oculta de la materia capaz de reunir los elementos semejantes y de separar los elementos heterogéneos.

Los filósofos de la Edad Media apenas hicieron otra cosa que comentar las opiniones de los pensadores griegos. Sólo en el siglo XVII se encuentran nuevas concepciones sobre la naturaleza del calor. **Descartes, Bacon** (1561-1626), **Newton** y **Boyle** (1626-1691) sospechaban las relaciones entre los fenómenos caloríficos y mecánicos; Boyle, a pesar de sus notables ideas, imbuido de la teoría del flogisto, distinguía el fuego del calor y consideraba éste como una substancia material.

A finales del siglo XVIII se cree que el calor es un fluido imponderable y su transmisión se explica mediante dos hipótesis: la ondulatoria y la de la emisión. Los partidarios de ésta, entonces en mayoría, admitían que los cuerpos emiten de manera continua una substancia imponderable llamada **calórico. Bernoulli, Euler** y, sobre todo, **Rumford** (1753-1814), partidarios de la teoría ondulatoria, muestran que el frotamiento de dos cuerpos puede producir calor indefinidamente, lo que no explica la teoría de la emisión. **Lavoisier** (1743-1794) fue quien primero demostró que los fenómenos caloríficos pueden demostrarse completamente por la materialidad del calórico y por los movimientos vibratorios de las moléculas. El principio de **Carnot** (1796-1832) no es en definitiva más que el desarrollo racional de las ideas de Lavoisier. **Robert von Mayer** (1814-1878) en 1842, **Joule** (1818-1889) en 1843, **Colding** y **Helmholtz** (1821-1894) completaron los trabajos de Carnot sobre la equivalencia del calor y del trabajo, que fue nuevamente demostrada por **Clapeyron** (1799-1864).

La teoría mecánica del calor ha sido perfeccionada por **Clausius** (1822-1888), **Thomson (lord Kelvin)** (1824-1907), **Boltzmann, Rankine, Regnault** (1810-1878) y **Hirn** (1815-1890).

W. Thomson y, después, Helmholtz, desarrollaron finalmente la idea de que la energía mecánica tiende siempre a transformarse en calor; según el principio de Carnot, el calor, al contrario, sólo se transforma en trabajo de manera incompleta. Por consiguiente (degradación de la energía), los cuerpos tienden a modificarse hacia un estado de equilibrio definitivo de temperatura.

Según las ideas actuales, la energía calorífica está constituida, por una parte, por la energía cinética de los moléculas de los gases, y por otra, por la energía potencial debida a las atracciones intermoleculares.

Propiedades generales. — El calor lo perciben nuestros sentidos de manera directa. Las sensaciones de calor o frialdad de un cuerpo las percibimos mediante el contacto de nuestra epidermis con dicho cuerpo; la sensación de calor será más intensa cuanto más caliente esté el cuerpo que se toca. Las nociones de frío y de calor son completamente relativas y desde el punto de vista físico sólo hay cantidades de calor más o menos grandes para cada cuerpo, que hacen que parezcan más o menos calientes o más o menos fríos con respecto a un tercer cuerpo de comparación, nuestra mano, por ejemplo.

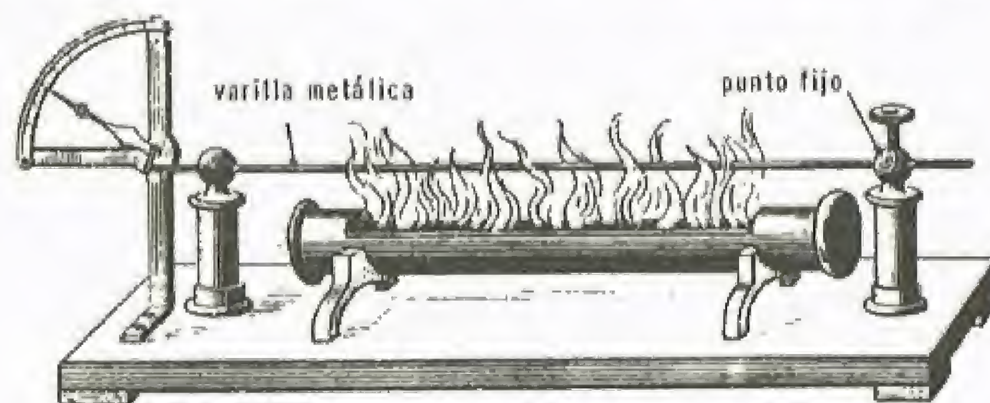


Fig. 106

Lo que percibimos en contacto con un objeto es, con más precisión, la *temperatura* del objeto tocado o, más axactamente todavía, la diferencia entre la temperatura del objeto y la de la mano que lo toca. Ahora bien, aunque la sensación experimentada sea tanto más intensa cuanto más elevada es la temperatura, se trata sólo de un apreciación muy rudimentaria que no puede considerarse como medida de la temperatura. Para esto se utilizan otras propiedades del calor, cuyos efectos son susceptibles de medida, entre ellos, por ejemplo, la dilatación, una de las propiedades primeramente observadas.

Con muy raras excepciones, todos los cuerpos aumentan de volumen al calentarse y disminuyen al enfriarse. Los sólidos experimentan este aumento de volumen en todas las direcciones, por lo general, y puede observarse en una de ellas.

El aparato de la figura 106 es una barra metálica sostenida por dos soportes, en uno de los cuales la varilla se fija rígidamente por un tornillo mientras que en el otro puede deslizarse, de forma que cuando se enciende la mecha embebida de alcohol y, como consecuencia del calor producido, se dilata la barra, su extremidad libre empuja al dilatarse el brazo pequeño de una palanca curvada, cuya aguja se desplaza ante un cuadrante que permite observar la dilatación amplificadamente.

Otra experiencia igualmente característica es la llamada del anillo de Gravesande. Este aparato es un soporte del que pende una esfera metálica cuyo diámetro permite pasar con justeza a través de un anillo del mismo metal cuando las dos piezas están a la misma temperatura. Si se calienta la esfera dejando el anillo a la temperatura ordinaria, aquélla se dilata y no pasa por el anillo; en cambio, una vez

enfriada podrá pasar de nuevo libremente, o también en el caso en que se hayan calentado simultáneamente y a la misma temperatura la esfera y el anillo.

La dilatación es, pues, una primera propiedad térmica de los cuerpos, que nos permite llegar a la noción de temperatura.

Una segunda magnitud fundamental es la *cantidad de calor* que se supone reciben o ceden los cuerpos al calentarse o al enfriarse, respectivamente.

La cantidad de calor que hay que proporcionar a un cuerpo para elevar su temperatura un número de unidades determinado es tanto mayor cuanto mayor es la masa de dicho cuerpo, y es proporcional a lo que se denomina *calor específico* de la substancia de que está constituido.

Cuando se calienta el cuerpo en uno de sus puntos, el calor se propaga a los puntos próximos, y la diferencia de temperatura entre el punto calentado directamente y otro punto situado a cierta distancia es tanto menor cuanto mejor conductor del calor es dicho cuerpo. Cuando la *conductibilidad térmica* de un cuerpo es pequeña, la transmisión del calor se manifiesta por un descenso rápido de la temperatura del punto calentado a otro próximo. Así sucede con el vidrio, la porcelana, el caucho, etc. En el caso contrario, por ejemplo con los metales como el cobre y la plata, la conductibilidad térmica es muy grande y el descenso de temperatura de un punto calentado a un punto próximo es pequeña.

Se desprende de lo anterior que el estudio del calor sólo puede hacerse después de haber definido primeramente de una manera exacta los dos términos relativos al propio calor, es decir:

1º La temperatura, que se expresa en *grados;*

2º La cantidad de calor, que se expresa en *calorías* o en *termias.*

Habrá después que definir ciertas propiedades específicas de los cuerpos en su manera de comportarse con respecto al calor; estas propiedades son:

1º La dilatación;

2º El calor específico;

3º La conductibilidad térmica.

Insistiremos más adelante sobre cada uno de estos puntos particulares al establecer las unidades que sirven para medir los diferentes términos y al estudiar los métodos que se emplean para efectuar estas medidas.

Las fuentes de calor. El fuego. — Las sensaciones de calor o de frío que debieron experimentar los primeros hombres sólo pudieron ser debidas a la acción del Sol o a la carencia del mismo. El fuego sólo podía proceder, para ellos, de los relámpagos y de los incendios de los bosques que ocurrieran de vez en cuando.

Cuando por un feliz azar habían podido obtener algunas ramas encendidas, tenían que hacer toda clase de esfuerzos para que esa llama no se apagara, de forma que pudiera servir para encender otros hogares que les permitieran alumbrarse durante la noche, ahuyentar a los animales feroces, cocer sus alimentos y, más tarde, emprender, incluso, los primeros rudimentos de las industrias cerámicas y del trabajo de los metales.

El fuego, al que atribuían origen celeste, y su conservación, se confiaba a los sacerdotes, que debían mantener la llama inextinguible a costa, con frecuencia, de los peores suplicios o de su vida. No se conocía medio alguno de ignición de las materias combustibles, hasta que se logró utilizar la chispa obtenida golpeando el sílex con un pedazo de hierro, o hasta que pudo conseguirse, mediante frotamientos enérgicos de dos pedazos de madera, producir suficiente calor para que apareciera una brasa.

El dominio del fuego fue el comienzo de las diversas civilizaciones, y el desarrollo de éstas hasta las épocas modernas ha sido paralelo a los progresos logrados en las artes fundadas en la utilización del calor. No se pueden concebir los orígenes de la raza humana más que en los países de clima suficientemente cálido, ya que su extensión a los países más fríos sólo ha sido posible a causa de las facilidades obtenidas mediante la producción de un calor no procedente directamente del Sol.



Producción de fuego por frotamiento, según un antiguo documento mexicano

En la actualidad, los medios de producir calor son muy numerosos. Es sabido que todas las formas que puede adoptar la energía tienen tendencia a transformarse en calor, al menos parcialmente.

El modo de producción del calor que es a la vez el más antiguo y el más usual de los procedimientos actuales se basa en las transformaciones de la energía química debida a la oxidación de las diversas materias naturales en energía calorífica: la combustión al aire libre de la madera, del carbón o del petróleo, en hornos adaptados al uso a que están destinados y protegidos contra las pérdidas de calor al exterior. La inflamación inicial, siempre necesaria, se obtuvo fácilmente desde que se conocieron materias muy inflamables, como la gasolina, empleada en los encendedores, o como el fósforo, que se inflama por un ligero roce.

La producción del calor por oxidación viva de las materias naturales combustibles sigue siendo, en la actualidad, la fuente más sencilla y más económica de calefacción industrial y de los locales; desde el punto de vista físico se trata sólo de un procedimiento de rendimiento mediocre, ya que la evacuación de los gases y del humo de la combustión representa la pérdida de una cantidad de calor considerable.

Desde el punto de vista teórico, la transformación de la energía eléctrica en calor es de mucho mayor rendimiento, ya que las pérdidas de calor quedan limitadas a las debidas a la conductibilidad y a la radiación del horno, y pueden reducirse, sin límite, con aislantes térmicos suficientes. Sin embargo, el precio de costo de la energía eléctrica es todavía demasiado elevado para que puedan generalizarse sus aplicaciones. Puede, no obstante, preverse que, como las riquezas de carbón y de aceites minerales van disminuyendo sin cesar, y son, en cambio, cada vez mayores los intentos que se hacen para utilizar otras formas de energía en la producción de electricidad, en un futuro, quizá próximo, se modificarán las condiciones económicas actuales, y aumentarán las aplicaciones de la electricidad a la producción de calor.

La electricidad como fuente de calor sigue ofreciendo gran interés cuando se trata de obtener temperaturas elevadas, difíciles de alcanzar mediante combustión. Desde este punto de vista, el descubrimiento del horno eléctrico abrió las vías de una industria hoy floreciente: la electroquímica industrial, que obtiene su energía mecánica del agua de las montañas y la transforma en electricidad para la preparación de metales variados y de productos químicos especiales. Se concibe fácilmente la posibilidad de obtener en una materia una temperatura mucho más elevada mediante la electricidad que mediante otros medios, porque, en el método eléctrico, el cuerpo que se calienta es el propio asiento de la producción de calor, mientras que por los restantes métodos de caldeo la substancia que hay que poner a una temperatura elevada debe ponerse en un horno suficientemente refractario y sólo recibe el calor indirectamente a través de dicho horno. Además, la temperatura del arco eléctrico es la temperatura más elevada que se puede obtener prácticamente.

Termometría

Reseña histórica. Definición de la temperatura. Escala teórica; temperatura absoluta. Termómetro de mercurio. Otros aparatos termométricos. Producción de temperaturas muy altas y muy bajas

Reseña histórica. — Algunos autores atribuyen la invención del termómetro a Roger Bacon, y otros a Galileo, pero el primer termómetro conocido es el de **Van Helmont** (1577-1644), que comprobó los cambios de volumen de una masa de agua contenida en una esfera de vidrio, prolongada en su parte superior por un tubo fino.

Van Drebbel (1572-1634) inventó, en 1621, un barotermoscopio, consistente en una masa de aire que levantaba una columna de agua; el instrumento daba indicaciones equivocadas a causa de las variaciones de la presión atmosférica.

Los académicos del Cimento, en Florencia, en 1660, volvieron a utilizar entonces el aparato de Van Helmont y substituyeron el agua por alcohol; marcaron con un cero el lugar en que se detenía el nivel cuando se colocaba el termómetro en una bodega profunda. Por encima y por debajo hicieron divisiones iguales, pero arbitrarias. **Boyle** fue quien primeramente propuso que se adoptara como punto fijo el punto de congelación del agua.

En 1694, un físico de Pavía, **Renaldini,** imaginó tomar como puntos fijos de la graduación las temperaturas respectivas de la fusión del hielo y de la ebullición del agua, y dividir el intervalo en partes iguales, opinión que no fue seguida, probablemente porque la temperatura de ebullición del agua depende de la presión.

Newton construyó, en 1701, un termómetro con seis puntos fijos (hielo fundido, temperatura del cuerpo humano, fusión de la cera, ebullición del agua, fusión de cierta aleación y fusión del plomo).

Amontons (1663-1705) construyó un termómetro en el que se utilizaban las variaciones de presión que sufre una masa fija de aire; este termómetro es el antecesor del termómetro normal de hidrógeno.

En 1714, **Fahrenheit** (1686-1736) consiguió fabricar termómetros de mercurio (líquido propuesto por Halley en 1680) comparables entre sí mediante el empleo de dos puntos fijos poco cómodos. Luego adoptó el hielo fundente y el agua en ebullición (después de los trabajos de Amontons), pero utilizó una escala complicada (32º para el hielo fundente y 212º para el agua en ebullición). **Réamur** (1683-1757) adoptó en 1730 una escala más sencilla (0 y 80º).

Celsio (1701-1744) propuso en 1742 la división centesimal que se emplea actualmente en casi todos los países.

Definición de la temperatura. — Para calcular una temperatura hay que recurrir a una magnitud física X que varía con ella. Esta

magnitud sólo debe depender de la temperatura, proporcionar un solo valor de la misma para cada uno de sus propios valores y permitir una medida cómoda. Aunque los fenómenos de dilatación han sido los primeros que se han tomado en consideración, pueden igualmente escogerse otras magnitudes, como la presión de vapor saturante de un líquido, la diferencia de potencial de contacto de dos metales, la resistencia eléctrica de un conductor, la radiación luminosa de una fuente, etc.

Una vez escogida la magnitud, se establece como postulado, por razones de sencillez, que la temperatura es una función lineal de la misma:

$$t = a\,X + b,$$

en la que los coeficientes a y b quedan definidos por la elección de dos temperaturas determinadas.

En efecto, ciertos fenómenos se producen a una temperatura constante; así, la fusión y la ebullición de los cuerpos puros a una presión determinada. En las *escalas centesimales* (denominadas en otras épocas *centígradas*), en la actualidad universalmente empleadas, al menos en el campo científico, se ha adoptado como puntos 0 y 100, respectivamente, las temperaturas de fusión del hielo y de ebullición del agua pura, a la presión atmosférica normal de 76 centímetros de mercurio.

En tal escala, la relación anterior se escribirá

$$t = 100\,\frac{(X - X_0)}{(X_{100} - X_0)},$$

donde X_0 y X_{100} indican los valores particulares de la magnitud termométrica X para cada uno de los dos puntos fijos.

Esta relación puede escribirse:

$$X = X_0\,(1 + ct),$$

donde $c = \dfrac{X_{100} - X_0}{100\,X_0}$ se denomina *coeficiente termométrico.*

Indiquemos, igualmente, la *escala Réaumur*, en la cual los dos puntos fijos anteriores están representados por las temperaturas 0 y 80°, y la *escala Fahrenheit*, todavía utilizada en los países anglosajones, en la que los valores de dichos puntos fijos son, respectivamente, 32 y 212.

Una vez escogidos el cuerpo y la magnitud termométrica, y los coeficientes a y b, la temperatura del *termómetro* queda definida con precisión, pero lo que importa, evidentemente, es la temprature de un cuerpo cualquiera.

La experiencia muestra que los cuerpos calientes elevan la temperatura de los cuerpos fríos colocados a su alrededor; se dice que el calor se propaga de unos a otros por conducción, radiación y convección. Si en un recinto, aislado térmicamente del exterior, se colocan dos cuerpos, se comprueba que sus temperaturas varían en sentido inverso, y que acaban fijándose. Se dice entonces que sus temperaturas son iguales. Esta definición es lógica, porque la experiencia muestra que dos temperaturas reconocidas iguales a una tercera son iguales entre sí.

Examinemos las elecciones posibles de la magnitud X.

La dilatación de los sólidos debe rechazarse por ser demasiado pequeña, pero sobre todo a causa del fenómeno denominado *histéresis*: el sólido, al enfriarse después de calentarse, no recupera exactamente su longitud y su volumen primitivos, sino que conserva una dilatación residual que sólo desaparece lentamente al cabo del tiempo; por consiguiente, a un valor del volumen de un sólido no corresponde exactamente un valor determinado de la temperatura.

Los líquidos se dilatan más y no presentan este defecto, pero hay que colocarlos dentro de una envoltura sólida, y se observa una dilatación aparente del líquido dentro del sólido, en el cual sigue subsistiendo la histéresis. Además, los líquidos sólo sirven para intervalos de temperatura bastante limitados, a pesar de lo cual se emplean en los termómetros prácticos más corrientes.

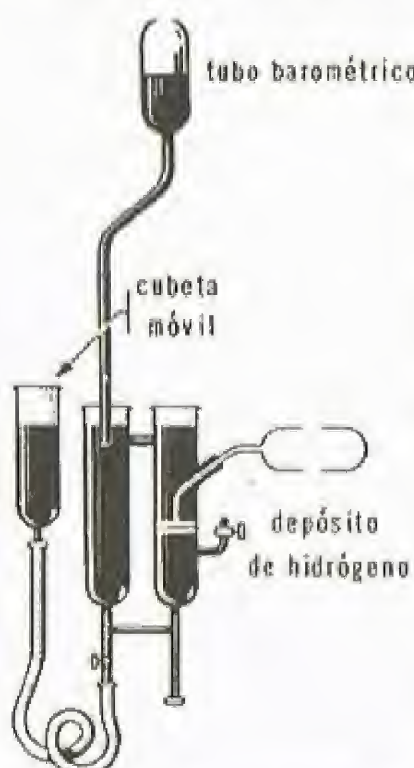


Fig. 107.—**Esquema del termómetro de hidrógeno**

Los gases se dilatan todavía más que los líquidos y el inconveniente del recipiente sólido es entonces despreciable. Por consiguiente, se recurre a ellos para definir la temperatura. En la escala centesimal normal, la temperatura es una función lineal de la presión de una masa constante de hidrógeno mantenida a volumen constante, siendo su presión a 0° C un metro de mercurio normal. El empleo de los termómetros de hidrógeno que se utilizan en laboratorios de meteorología, y que sirven para verificar la graduación de los termómetros prácticos de precisión, se basa en este principio (*figura* 107).

En la actualidad, la temperatura se define no por el hidrógeno, sino por un "gas perfecto". Más adelante veremos cómo se ha adquirido este concepto teórico. La temperatura centesimal legal es, por definición, una función lineal de la presión de una masa invariable de gas perfecto mantenida a volumen constante y se evalúa en grados C (grados Celsio).

Designando por p_0 la presión del gas a 0° C y por p su presión a t grados C, la relación de definición es

$$p = p_0\,(1 + ct),$$

en donde c, coeficiente termométrico legal, es el coeficiente de dilatación de los gases perfectos, que vale $\dfrac{1}{273{,}15}$.

Escala teórica; temperatura absoluta. — Las escalas centesimales son escalas convencionales que sólo permiten fijar las temperaturas. Es posible dar una definición termodinámica de la temperatura recurriendo al principio de Carnot (v. pág. 60). La temperatura teórica así definida se convierte en una magnitud medible, con la que se pueden efectuar las operaciones características de tales magnitudes (suma, división).

Esta temperatura absoluta puede considerarse proporcional a la presión de una masa invariable de gas perfecto mantenido a volumen constante. El coeficiente de proporcionalidad se escoge de forma que haya una diferencia de 100 unidades entre los dos puntos fijos fundamentales. Es fácil mostrar que esta temperatura absoluta T y la temperatura centesimal legal están ligadas por la relación

$$T = t + \frac{1}{c} = t + 273{,}15.$$

Esta temperatura está calculada en grados K (grados Kelvin).

La temperatura absoluta es, como la presión de un gas, siempre positiva. El valor 0, llamado cero absoluto, representa en realidad una temperatura extremamente baja, imposible de obtener, pero a la cual cabe aproximarse cada vez más. Esto explica que la temperatura centesimal legal no pueda representarse por un número inferior a — 273,15° C.

Termómetro de mercurio. — Éste es un aparato que utiliza la dilatación aparente del mercurio en el vidrio. Se ha escogido el mercurio con preferencia a otros líquidos porque puede obtenerse fácilmente muy puro y, además, porque no moja el vidrio y puede utilizarse entre — 39° C y + 357° C, que son sus puntos de solidificación y de ebullición. El vidrio empleado debe presentar una dilatación residual lo más pequeña posible; se le recuece después de la fabricación del termómetro y antes de su graduación, a fin de reducir este defecto cuanto sea dable.

El termómetro consta de un depósito cilíndrico que se prolonga por una varilla fina de sección constante. Se hace penetrar por el extremo superior, abierto al principio, mercurio, que se hierve para expulsar todo el aire; después se calienta el mercurio a la temperatura máxima que deba indicar el termómetro y se cierra la abertura. El vidrio suele llevar, en la parte superior de la varilla, una dilatación pequeña, para evitar la ruptura del aparato en caso de que tenga que marcar una temperatura superior a la máxima prevista.



Fig. 108.—Esquema del termómetro de mercurio

Para graduar el termómetro hay que determinar los dos puntos fijos, operación que debe efectuarse con la mayor precisión posible; para determinar el punto de fusión del hielo se utiliza el dispositivo, muy sencillo, de la figura 109; un embudo E, lleno de terrones de hielo, se apoya sobre un recipiente cilíndrico V, en el que gotea el agua de la fusión. El termómetro T que hay que graduar está sumergido, por su parte inferior, en el hielo, de forma que el depósito del mercurio esté completamente sumergido en el mismo, y se siguen los desplazamientos del nivel del líquido en la columna. Cuando el nivel se ha estabilizado en un valor fijo, se hace sobre el vidrio del termómetro una señal pequeña con una punta de diamante. Para la determinación del punto 100 se utiliza el aparato de la figura 110, que es una caldera de chapa, C, con agua, en cuya parte superior lleva un tubo T de evacuación del vapor, pero el vapor vuelve sobre sí mismo por un tubo U, concéntrico y exterior a T, de forma que el tubo T interior permanece caliente por el retorno del vapor, que se evacua finalmente por el tubo S. Una vez colocado el termómetro en el eje del tubo T, se espera que señale la temperatura de equilibrio y se marca sobre su varilla el nivel del líquido. La división así trazada corresponderá a 100° C si la presión del vapor del agua vale exactamente 76 centímetros de mercurio, debiéndose hacer una corrección en caso contrario. Para evitar un error debido a la dilatación residual del vidrio, es indispensable determinar el punto 100 antes del punto 0.

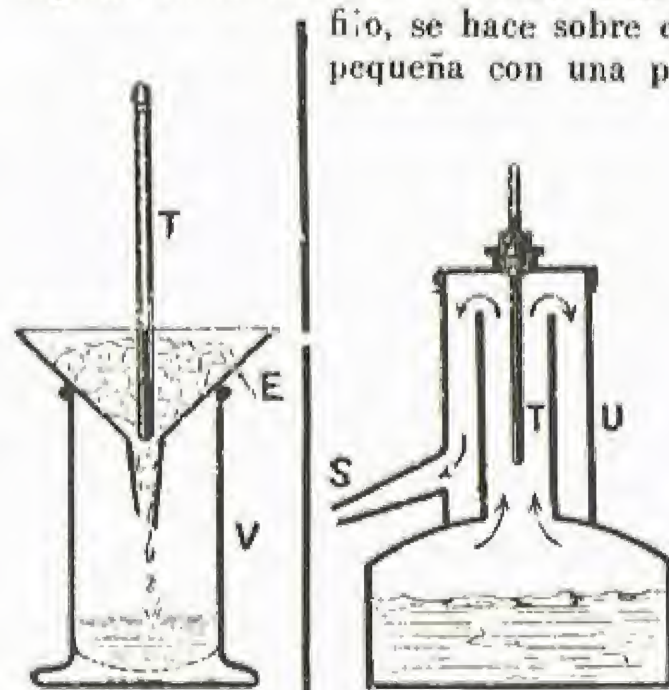


Fig. 109 *Fig.* 110

Finalmente, se divide en 100 partes iguales el intervalo comprendido

entre los puntos 0 y 100 así obtenidos, mediante la máquina de dividir. Esta división se prolonga a ambas partes de los puntos 0 y 100.



Fig. 111

Merced a ciertas correcciones efectuadas sobre la temperatura leída, el termómetro de mercurio puede compararse con sí mismo con una aproximación de 1/500 de grado, pero entre un termómetro y otro existen diferencias de escalas debidas a que los vidrios no son idénticos. Los aparatos de precisión se comparan también con el termómetro normal de hidrógeno, lo que constituye una de sus principales aplicaciones.

En el termómetro práctico de uso corriente se substituye con frecuencia el mercurio por alcohol coloreado. El aparato, compuesto por un depósito esférico B y una varilla A, se fija sobre una plancha que lleva la graduación (*fig.* 111). También se emplea el tolueno, que permite determinar temperaturas hasta de — 180° C sin congelarse.

Los termómetros de líquidos permiten la fabricación de aparatos de máxima y de mínima, que indican la temperatura más alta y más baja que ha indicado el termómetro entre dos observaciones. El funcionamiento de estos aparatos se funda en fenómenos de capilaridad: el mercurio, que no moja el hierro, desplaza, empujándolo, un índice de dicho metal cuando asciende la temperatura, índice que permanece en el mismo sitio cuando desciende la columna de mercurio, a causa del frotamiento contra el vidrio (*fig.* 112). Inversamente, el alcohol moja un índice de hierro que es arrastrado por el menisco al descender la columna de alcohol, permaneciendo siempre sumergido en el mismo; en cambio, cuando la columna de alcohol asciende, el índice permanece fijo (*fig.* 113). Los índices se llevan a su posición normal en todos los casos, por medio de un imán.

Fig. 112 *Fig.* 113

La figura 114 representa la disposición normal que suele adoptarse para un termómetro de máxima y de mínima. Es un aparato de alcohol con varilla doblemente curvada; el alcohol está separado en dos partes por una columna de mercurio que ocupa la curvatura inferior y cuyas extremidades indican la temperatura.

Los termómetros clínicos de máxima son todavía más sencillos; su columna, muy delgada, está graduada en décimas de grado, y su depósito de mercurio, muy pequeño, presenta un estrangulamiento estrecho a su salida. El mercurio asciende entonces normalmente por la columna, pero al descender, la resistencia opuesta por el estrangulamiento produce la ruptura de la columna, que conserva la posición que había adoptado en el máximo de la graduación. La vuelta a la posición normal se obtiene fácilmente sacudiendo el termómetro.

Fig. 114

Para los termómetros de *mínima* se emplean habitualmente aparatos de alcohol cuyo tubo está colocado horizontalmente (*fig.* 113). La columna del líquido lleva un índice I, de vidrio o de esmalte, que es mojado por el alcohol y arrastrado por el menisco cuando desciende la columna, permaneciendo, en cambio, fijo durante el ascenso.

La figura 114 representa uno de los tipos de termómetros de máxima y mínima.

Otros aparatos termométricos. — Además de los termómetros que se fundan en la dilatación de gases o de líquidos, existen otros aparatos basados en fenómenos muy diferentes, y que se describirán de forma general en diversos capítulos, según cual sea dicho fenómeno. Estos aparatos se emplean principalmente para la medida de temperaturas muy elevadas o muy bajas, pero algunos de ellos pueden ser preferibles al termómetro de mercurio a causa de su sensibilidad mucho mayor, que puede llegar hasta la millonésima de grado. Sus principales características son:

El *termómetro de resistencia*, que se basa en la variación de la resistencia eléctrica de un conductor en función de su temperatura. Suele llevar un hilo de platino intercalado en un puente de Wheatstone. Como se conoce la ley de variación de la resistencia del hilo, su medida permite conocer la temperatura.

El *par termoeléctrico* utiliza la diferencia de potencial que existe entre dos metales en contacto (v. PILAS TERMOELÉCTRICAS, pág. 129). Esta fuerza electromotriz de contacto depende de la temperatura del punto de soldadura. Si dos hilos diferentes (por ejemplo, platino y platino rodiado al 10 por 100) soldados en dos puntos A y B tienen sus soldaduras a temperaturas diferentes, en el circuito cerrado se manifiesta una fuerza electromotriz de conjunto que depende de la diferencia de esas temperaturas. Una de las soldaduras se coloca en el hielo fundente y se podrá, gracias a una medida de potencial, obtener la temperatura de la otra. En este principio se fundan los pirómetros industriales, en los cuales el voltímetro se gradúa directamente en grados.

El *pirómetro óptico o de radiaciones*, utilizable a temperaturas elevadas, se basa en la emisión luminosa de la fuente calorífica cuya temperatura quiere determinarse. La potencia irradiada y su distribución en el espectro dependen de la temperatura de la fuente (v. ÓPTICA, RADIACIÓN). En los aparatos del tipo más empleado, un sistema óptico da una imagen del objeto calentado, cuyo brillo se compara con el de una fuente luminosa que se toma como patrón. Para ello puede utilizarse un filamento que se hace luminoso mediante el paso de una corriente cuya intensidad se regula; la observación se hace, por lo general, con luz monocromática, utilizando un vidrio absorbente.

Producción de temperaturas muy altas y muy bajas. — Las temperaturas que se obtienen corrientemente en las llamas de combustión alcanzan 2 000° C y con el arco eléctrico se llega hasta 3 500° C. Existen otros dispositivos que permiten obtener temperaturas superiores, pero apenas se conocen substancias que puedan soportar sin daños tales temperaturas. Puede indicarse el empleo de ciertas *reacciones químicas*, como la explosión de la tetranitropentaeritrita (4 425° C) o el soplete de hidrógeno atómico de Langmuir (4 500°). En el *horno eléctrico de alta frecuencia* se coloca el cuerpo conductor que hay que calentar en el campo magnético rápidamente variable de la corriente alterna de un solenoide; es, entonces recorrido por corrientes de Foucault que, en unos cuantos minutos, pueden fundir la sílice o volatilizar el carbono. El *horno de rayos catódicos* consta de un tubo de vacío que contiene un cátodo en forma de casquete esférico cóncavo; un cuerpo colocado en el centro de curvatura se calienta rápidamente al recibir un flujo de electrones a gran velocidad. Pueden citarse también los *hornos de concentración de radiaciones* que, mediante la convergencia de rayos solares, han permitido obtener temperaturas de cerca de 6 000° C. Pero es, evidentemente, con la *energía nuclear* con la que se obtienen los resultados más extraordinarios. Se ha evaluado por extrapolación a 100 000° C la temperatura de las franjas de la explosión de la bomba atómica, y en varias centenas de millones la del centro de la bola de fuego.

En cuanto a los procedimientos empleados para el enfriamiento, se basan en la transformación de la energía calorífica de un cuerpo, ya en trabajo (expansión de un gas), ya en energía interna (fusión, vaporización, desimantación). Cuando se llega al cero absoluto, la ganancia de algunas centésimas de grado resulta muy difícil, ya que a una diferencia pequeña de temperatura corresponden variaciones considerables de las propiedades. Kamerlingh Onnes y Keesom obtuvieron en el laboratorio de Leyden las temperaturas más bajas *evaporando el helio líquido*; después Keesom, operando a una presión extremadamente baja, obtuvo, en 1932, 0°,71 K. Más recientemente, De Haas, en Holanda, y Giauque, de los Estados Unidos, recurrieron a la *desimantación adiabática*; desimantando, por brusca supresión del campo magnetizador, una substancia paramagnética, tal como ciertos alumbres, se la enfría muy enérgicamente. De Haas obtuvo de esta forma, en 1947, una temperatura evaluada a 0°0023 K.

Dilatación

Reseña histórica. Dilatación de los sólidos. Dilatación de los líquidos. Medida de la dilatación absoluta del mercurio. Dilatación de los gases a presión constante. Variación de presión a volumen constante. Gases perfectos. Aplicaciones de la dilatación de los cuerpos

Reseña histórica. — Los fenómenos de dilatación son conocidos desde hace mucho tiempo. Pueden citarse las experiencias de **Fizeau** (1866) y **Guillaume** (1897) con los sólidos; las de **Dulong** y **Petit** y las de **Regnault**, con los líquidos y las de **Gay-Lussac** y Regnault, con los gases.

Dilatación de los sólidos. — Salvo algunas substancias llamadas *anisótropas*, como ciertos cristales o ciertos cuerpos organizados, los sólidos homogéneos, como los líquidos y los gases, se dilatan igualmente en todas las direcciones. Si se toma una varilla de longitud l_0 a la temperatura 0°, su longitud a una temperatura t diferente, será l.

Se llama *coeficiente de dilatación lineal* del sólido entre 0 grados y t° C la cantidad

$$\lambda = \frac{l - l_0}{l_0 t},$$

es decir, el alargamiento medio que sufre, por una variación de temperatura de 1 grado, una longitud igual, a 0 grados, a la unidad de longitud. Esta igualdad, despejada con respecto a l, se escribe

$$l = l_0 (1 + \lambda t),$$

donde $1 + \lambda t$ es el llamado *binomio de dilatación lineal.*

Se considera igualmente la dilatación en volumen, y se define de manera análoga el *coeficiente de dilatación cúbica* de un sólido:

$$k = \frac{v - v_0}{v_0 t},$$

$$v = v_0 (1 + kt),$$

fórmulas en las cuales v_0 es el volumen del sólido a 0 grados y v su volumen a la temperatura t° C.

Puede considerarse la variación del volumen como resultado de la variación lineal de las tres dimensiones del cuerpo, partiendo del coeficiente de dilatación lineal λ. Supongamos, para simplificar, que estas tres dimensiones sean iguales, como en el caso de un cubo cuyo lado tiene de longitud l_0 a 0 grados. Se tendrá

$$v_0 = l^3_0,$$
$$v = l^3,$$

con $l = l_0 (1 + \lambda t)$ y $v = v_0 (1 + kt)$.

Se deducirá

$$1 + kt = (1 + \lambda t)^3 = 1 + 3\lambda t + 3\lambda^2 t^2 + \lambda^3 t^3.$$

Estos últimos términos suelen ser despreciables, por ser muy pequeños, y entonces se obtiene

$$k = 3\lambda,$$

es decir, que el coeficiente de dilatación cúbica es igual, con mucha aproximación, al triple del coeficiente de dilatación lineal.

La masa del cuerpo permanece constante durante la variación de la temperatura que modifica sus dimensiones, y, por consiguiente, habrá variación de la masa específica (o densidad absoluta) d. La masa m valdrá:

$$m = v_0 d_0 = vd,$$

y, por consiguiente

$$d = \frac{v_0}{v} d_0 = \frac{v_0 d_0}{v_0 (1 + kt)} = \frac{d_0}{1 + kt}.$$

El coeficiente de dilatación de los sólidos no es absolutamente constante con la temperatura. La materia sufre, al calentarse, transformaciones moleculares que preparan el cambio de estado que sufrirá en su fusión. Para diferencias de tempratura bastante grandes, el binomio $(1 + \lambda t)$ debe substituirse por el polinomio:

$$(1 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3 + \ldots),$$

cuyo número de términos puede ser 3 o incluso 4, según sean la precisión buscada y los límites de las temperaturas entre las cuales es aplicable la fórmula.

La medida de los coeficientes de dilatación debe hacerse, por consiguiente, entre temperaturas bastante próximas para que pueda despreciarse esta variación; entonces se obtiene un coficiente de dilatación medio entre las dos temperaturas extremas escogidas.

El instrumento empleado para la medida precisa de la dilatación de los sólidos es el *comparador*: consiste éste en una cubeta llena de agua, cuya temperatura puede mantenerse constante para diversos valores de la misma. La barra sobre la que debe hacerse la medida lleva hacia sus extremidades dos líneas finas de referencia, situadas a un metro de distancia, aproximadamente; se sumerge en el agua de la cubeta y se colocan encima de cada línea de referencia microscopios provistos de micrómetros que permitan anotar, para cada temperatura constante del baño, la posición de las líneas de referencia, cuya distancia se ha medido cuidadosamente a 0 grados. Las variaciones observadas en los micrómetros al pasar de una temperatura a otra permiten calcular el coeficiente de dilatación lineal de la barra.

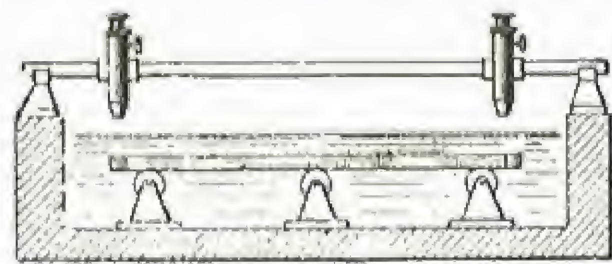


Fig. 115

La figura 115 muestra la disposición general que se emplea para las medidas en el comparador.

Los metales tienen un coeficiente de dilatación lineal relativamente grande; ciertas aleaciones, como la de los aceros al níquel que, para una proporción determinada de níquel, presentan una dilatación casi nula (invar). Por otra parte, los vidrios, las porcelanas y las materias de esta naturaleza tienen coeficientes menores, como indica el siguiente cuadro:

SUBSTANCIAS	COEFICIENTES
Latón	0,0000189
Cobre	0,0000172
Oro	0,0000155
Hierro	0,0000122
Vidrio blanco	0,0000089
Flint-glass	0,0000081

Dilatacion de los líquidos. — Los datos generales sobre la dilatación cúbica de los sólidos pueden aplicarse enteramente a los líquidos, pero los métodos de medida de los coeficientes de dilatación difieren muy sensiblemente a causa de su estado líquido, que obliga a colocarlos en el interior de un recipiente para hacer sobre ellos las observaciones necesarias a la determinación del cambio de volumen. La materia que constituye el recipiente tiene su propio coeficiente de dilatación y, por consiguiente, la medida hecha es la diferencia entre los dos efectos. Así se determina la *dilatación aparente* del líquido dentro del sólido que lo envuelve.

El método más corriente de medida de los coeficientes de *dilatación absoluta* de los líquidos consiste en construir un termómetro con el líquido que hay que estudiar; este aparato, denominado *dilatómetro*, lleva una escala arbitraria de divisiones iguales, es decir, que a cada división corresponde el mismo volumen de líquido de la columna.

Este dilatómetro se sumerge en hielo fundente, y se anota la posición en la escala de la parte superior del líquido (división n_0). Se le coloca después a una temperatura mayor t, como la del agua hirviendo, y se observa la nueva altura del líquido en la columna (n_1). Sea V_0 el volumen del depósito del dilatómetro y v_0 el de una división de la varilla, ambos medidos a 0° C, y V y v sus valores a t° C. Podrá escribirse que el volumen del líquido a 0° C es:

$$U_0 = V_0 + n_0 v_0,$$

y, a t° C: $$U = V + n_1 v = (V_0 + n_1 v_0)(1 + kt),$$

donde k es el coeficiente de dilatación cúbica del vidrio de la envoltura.

La variación del volumen entre 0 y t es, por consiguiente,

$$U - U_0 = V_0 + n_1 v_0 + V_0 kt + n_1 v_0 kt - V_0 - n_0 v_0,$$
$$U - U_0 = (n_1 - n_0) v_0 + (V_0 + n_1 v_0) kt.$$

El coeficiente de *dilatación absoluta* del líquido δ es exactamente como

$$U = U_0 (1 + \delta t),$$

y la comparación de los dos valores de $U - U_0$ permite determinar δ si se conocen los volúmenes V_0 y v_0, así como el coeficiente de dilatación k del vidrio.

Como la determinación de este último coeficiente es poco precisa, es evitada vaciando el dilatómetro y substituyendo el líquido estudiado por otro, como el mercurio, cuyo coeficiente de dilatación absoluta μ es conocido. Operando con él en la forma anterior, se obtiene una relación que da δ en función de μ.

Medida de la dilatación absoluta del mercurio. — El método anterior de comparación necesita que se conozca la dilatación absoluta del mercurio. Esta medida se hizo por un método ideado y utilizado por Dulong y Petit, y empleado de nuevo, más tarde, por Regnault. El principio del método es el siguiente: dos tubos verticales AB y CD (*fig.* 116), ensanchados en su parte superior y llenos de mercurio, por ejemplo, están unidos en su parte inferior por un tubo horizontal de diámetro pequeño, constituyendo un sistema de vasos comunicantes en el que en ambos tubos el mercurio tiene el mismo nivel si la temperatura es la misma en las dos ramas verticales. La rama AB está rodeada de un depósito cilíndrico E con agua, y puede calentarse a diversas temperaturas constantes que se miden con el termómetro T; la rama CD puede, al contrario, enfriarse hasta 0° por el hielo fundente contenido en un depósito F.

Al comienzo, las dos ramas están a la misma temperatura, 0° C por ejemplo, y su nivel es el mismo, pero si se calienta el depósito E a una temperatura t constante, el mercurio ascenderá en la rama AB a causa de la dilatación del mercurio, cuya densidad disminuye de d_0 a d_t, y el de la rama CD desciende a h_0.

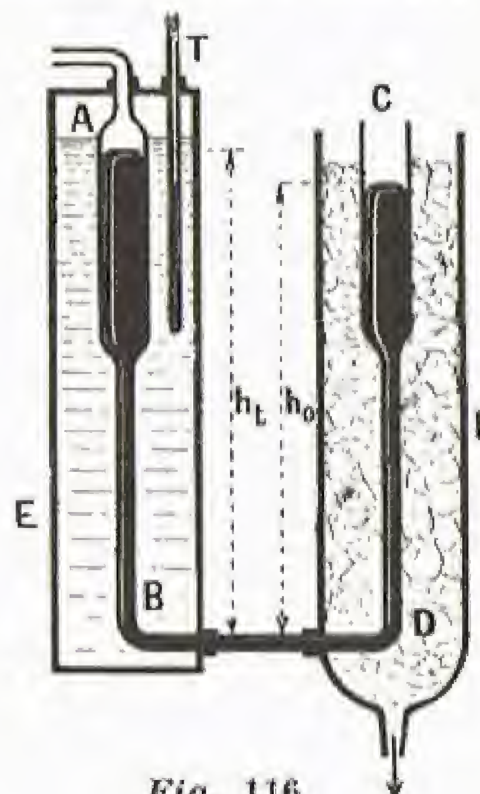


Fig. 116

En virtud de la ley de los vasos comunicantes, en el equilibrio, las presiones ejercidas por las dos columnas AB y CD sobre el fondo han de ser iguales; por consiguiente,

$$h_0 d_0 = h_t d_t \quad \text{o} \quad \frac{d_0}{d_t} = \frac{h_t}{h_0}.$$

Ahora bien, se ha visto anteriormente que

$$\frac{d_0}{d_t} = 1 + \mu t = \frac{h_t}{h_0}.$$

Por consiguiente, bastará con conocer h_0 y h_t, que se miden con el catetómetro, y t, que nos da el termómetro T, para deducir de estos valores el del coeficiente de dilatación absoluta

$$\mu = \frac{h_t - h_0}{h_0 t}.$$

La dilatación de los tubos de vidrio no interviene en este cálculo, que da directamente el valor del coeficiente de dilatación absoluta.

El valor del coeficiente medio del mercurio entre 0° C y 100° C es 0,000 183, pero este valor aumenta ligeramente con la temperatura. Los otros líquidos siguen, generalmente, una ley de variación análoga, salvo el agua, cuyo volumen disminuye cuando la temperatura varía entre 0° C a 4° C, presentando un mínimo a esta última temperatura, y aumentando después entre 4° C y 100° C. El agua posee, pues, su densidad máxima a la temperatura de 4° C, y a esta temperatura su masa específica es sensiblemente igual a la unidad, a causa de la elección del kilogramo.

Dilatación de los gases a presión constante. — Mientras que el volumen de un líquido o de un sólido no depende prácticamente de la presión a la que está sometido, con los gases ocurre diferentemente. Por consiguiente, es necesario estudiar también sus variaciones de volumen bajo la influencia de la temperatura conservando la presión constante. La experiencia muestra que basta, entonces, con una ligera elevación de la temperatura para que su dilatación sea importante.

El coeficiente de dilatación α de los gases a presión constante se define exactamente de la misma manera que el coeficiente de los sólidos

y líquidos. Si v_0 y v son el volumen del gas a 0° C y a la tempeartura t a la misma presión, se tendrá, respectivamente, por definición,

$$v = v_0 (1 + \alpha t).$$

Este coeficiente fue medido por Gay-Lussac, por medio del dispositivo del esquema de la figura 118. El gas se mantiene a la presión atmosférica, y sus variaciones de volumen se determinan por el desplazamiento de un índice de mercurio en una varilla cilíndrica horizontal graduada.



Fig. 117

La primera ley de Gay-Lussac expresa que el coeficiente α es independiente de la presión del gas, siempre que esta presión sea constante; que es también independiente de la temperatura t, y que es el mismo para todos los gases.

El valor obtenido por Gay-Lussac fue de $\frac{1}{273} = 0{,}00366$.

Experiencias más precisas han mostrado que la ley precedente, como la ley de Mariotte, es aproximada. Las gases siguen esta ley con tanta mayor precisión cuanto más se alejan de sus condiciones de licuefacción. Se trata, en realidad, de una ley límite, que tiende a ser exacta cuando la presión del gas tiende hacia cero.

Variación de presión a volumen constante. — Cuando se calienta un gas en un recipiente cerrado y de volumen invariable, la elevación de la temperatura se manifiesta por un aumento de la presión del gas, que pasa de su valor inicial p_0 a 0°, a p a t° C. El coeficiente β de aumento de presión a volumen constante es definido por la relación

$$p = p_0 (1 + \beta)\, t.$$

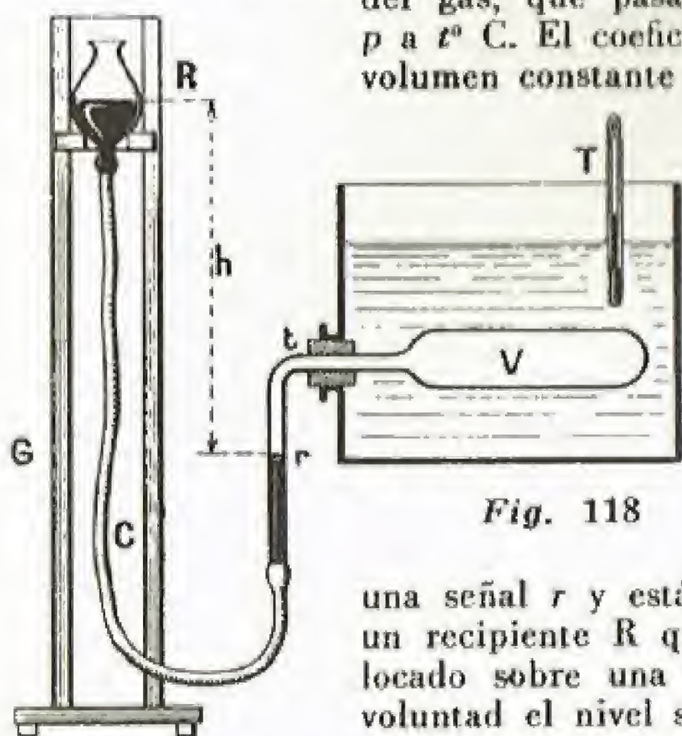


Fig. 118

Este coeficiente β puede medirse empleando el dispositivo de la figura 118. El gas que hay que experimentar está contenido en el depósito V y sumergido en agua que se mantiene sucesivamente a temperaturas constantes diversas. El depósito se prolonga hacia el exterior por un tubo de diámetro pequeño t, que lleva una señal r y está unido por un tubo de goma a un recipiente R que contiene mercurio, y está colocado sobre una corredera que permite variar a voluntad el nivel superior.

Para cada temperatura t del vaso V y del gas que contiene, se regula la altura h del nivel a fin de que el mercurio llegue a la señal de referencia r. Así se obtienen los diversos valores de la presión $p = p_0 + h$ en función de la temperatura t, que permiten la determinación de β.

Las medidas efectuadas por Gay-Lussac y Charles condujeron a la segunda ley siguiente:

El coeficiente β de aumento de presión de los gases calentados a volumen constante es igual al coeficiente α de dilatación a presión constante; por consiguiente, su valor es independiente de la presión a 0° C, de la temperatura y de la naturaleza del gas.

Esta ley, como la anterior, es una ley límite, válida en las mismas condiciones.

Gases perfectos. — Se denominan así los gases ideal que cumplen a cualquier temperatura, las leyes de Mariotte y Gay-Lussac. Por definición, su coeficiente de dilatación, α o β, tiene el valor límite del coeficiente de los gases reales a presión nula, valor que no depende de la temperatura ni de la naturaleza del gas, y que es igual a $\frac{1}{273{,}15}$.

El volumen, la presión y la temperatura de una masa constante de un gas perfecto están ligados por una relación que se denomina *ecuación de estado*.

Consideremos sucesivamente este mismo gas a 0° C con el volumen v_0 a la presión p_0, y después a t° C con el volumen v a la presión p. Supongamos que las variaciones de presión y de volumen, en vez de ser simultáneas, ocurren en dos momentos distintos:

1° El volumen v_0 a la presión p_0 se lleva a la temperatura t; se dilata a presión constante y su volumen v' será:

$$v' = v_0 (1 + \alpha t);$$

2° Se comprime el volumen v' a la temperatura constante t, hasta llegar a ser igual a v, siendo entonces la presión p. Aplicando la ley de Mariotte, se tendrá

$$pv = p_0 v' \qquad \text{o} \qquad v' = \frac{pv}{p_0}.$$

Substituyendo v' por su valor en 1°, se obtiene

$$\frac{pv}{1 + \alpha t} = p_0 v_0 \text{ constante,}$$

ecuación que podrá escribirse

$$pv = p_0 v_0 \alpha \left(\frac{1}{\alpha} + t \right).$$

Teniendo en cuenta que $\frac{1}{\alpha} + t$ es la temperatura absoluta T, y haciendo $p_0 v_0 \alpha = r$, se tendrá finalmente

$$pv = r\text{T}.$$

En el caso particular en que la masa de gas considerada, definida por el volumen y la presión, sea la masa molecular, la ecuación anterior se escribirá

$$pv = \text{RT},$$

y la constante R es la misma para todos los gases. Se trata de la *constante molecular de los gases perfectos*, cuyo valor en unidades C.G.S. es

$$\text{R} = 8{,}32.10^7,$$

o sea sensiblemente el doble del equivalente mecánico de la caloría.

La comparación mutua entre volúmenes de gases que pueden no estar a la misma presión ni a la misma temperatura en el momento de la determinación puede hacerse fácilmente aplicando la ecuación anterior, que permite reducir cada uno de ellos a las *condiciones normales* (0°C, y 76 centímetros de mercurio de presión).

Supongamos, por ejemplo, que se tiene un volumen v de gas a la temperatura t° C y a la presión H, expresada en centímetros de mercurio; se podrá obtener el volumen v_0, a 0° C y a la presión de 75 centímetros de mercurio, escribiendo

$$v\text{H} = v_0 \times 76\,(1 + \alpha t),$$

de donde

$$v_0 = v\,\frac{\text{H}}{76} \cdot \frac{1}{1 + \alpha t}.$$

La masa m' de un determinado volumen v de aire a la temperatura t° C y a la presión H se expresará, pues, gracias al conocimiento de la masa específica del aire a_0 en las condiciones normales (a_0 = 0,001 293 g/cm^3), por la fórmula

$$m = a_0 v\,\frac{\text{H}}{76} \cdot \frac{1}{1 + \alpha t}.$$

Para un gas diferente, cuya densidad con respecto al aire es $d = \frac{m}{m'}$, relación de las masas que ocupan el mismo volumen, se tendrá

$$m = a_0\, dv\,\frac{\text{H}}{76} \cdot \frac{1}{1 + \alpha t}.$$

Aplicaciones de la dilatación de los cuerpos. — Se ha visto que la dilatación lineal de los metales era del orden de una a dos cienmilésimas de su longitud por una variación de temperatura de un grado, es decir, para una temperatura de 100° C, uno a dos milímetros de longitud por metro, cantidad que no siempre puede despreciarse.

Siempre que las variaciones de longitud inherentes a las variaciones de temperatura influyen sobre el buen funcionamiento de un instrumento, se ha tratado de compensar los efectos de tal dilatación por otra de sentido inverso, de forma que sus consecuencias se anulen. La aplicación de un dispositivo de este tipo se ha venido empleando desde hace mucho tiempo en los péndulos de los relojes para conseguir que su longitud y, por consiguiente, la duración de las oscilaciones, sea independiente de la temperatura.



Fig. 119



Fig. 120

Los *péndulos compensados* constan de dos metales cuyos coeficientes de dilatación son lo más diferentes posible. La figura 119 muestra el péndulo que pende del gancho R, con la barra principal *ab* de la que está suspendida la masa M. La barra *ab*, en lugar de estar fijada directamente al gancho R, está unida por un elemento intermediario constituido simétricamente a cada lado del eje *ab* por una varilla *cd* del mismo metal que *ab*, que lleva una varilla *et* de un metal diferente y cuya dilatación se substrae de la de *cd*. Se empleará, por ejemplo, hierro o acero para las barras *ab* y *cd*, y latón, cuyo coeficiente es mayor, para las barras *ef*, cuya longitud se determinará con respecto a la longitud del péndulo, a fin de que su alargamiento sea igual y de signo contrario al del péndulo.

Basándose en el mismo principio, Graham utilizó como efecto compensador la dilatación del mercurio que constituye la propia masa del péndulo. El muelle de suspensión R (*fig.* 120) lleva una barra metálica AB que acaba en su parte inferior por una pequeña plataforma sobre la cual descansan dos frascos de vidrio colocados simétricamente a cada lado de AB, y que contienen mercurio M, M. El ajuste para obtener una dilatación nula se obtiene añadiendo o quitando mercurio de los dos frascos.

Los considerables esfuerzos que proporciona la dilatación de los metales son muy utilizados en mecánica en la operación denominada *frettage*. Para aumentar la resistencia mecánica de piezas metálicas tubulares o de otro tipo, se las rodea de anillos de acero de un diámetro menor y en el cual sólo puede introducirse la pieza que hay que tratar, después de haber dilatado los anillos calentándolos. Al enfriarse, los anillos aprietan fuertemente el tubo central, haciendo que aumente su resistencia. Este procedimiento se utiliza frecuentemente en la fabricación de cañones y también para el ajuste de los cubos y de las ruedas de madera de los coches. Los de acero se introducen en caliente y proporcionan al conjunto de estas piezas una gran rigidez.



Fig. 121

Las *láminas bimetálicas*, formadas por dos metales soldados directamente uno sobre otro y con coeficientes de dilatación diferentes, proporcionan sistemas que

dan desplazamientos amplificados de la dilatación. Supongamos dos láminas A y B, de cobre y de hierro, por ejemplo (*fig.* 121), soldadas una sobre otra; como la parte A está formada por un metal más dilatable que la parte B, las variaciones de temperatura del sistema producirán una curvatura de la lámina doble; si la parte superior de la lámina está encastrada en una pieza fija E, la parte inferior C adoptará una posición C′ cuando aumente la temperatura. El desplazamiento CC′ podrá utilizarse para accionar una aguja que se desplaza ante un cuadrante, disponiéndose así de un termómetro metálico. También se emplea como regulador de temperatura en las estufas calentadas con gas, por ejemplo; el desplazamiento de la lámina se utiliza entonces para disminuir la acción del gas cuando la temperatura sobrepasa cierto valor.

Cuando un líquido ocupa todo el volumen de un depósito metálico cerrado, la dilatación de este líquido ejerce presiones considerables sobre las paredes y tiende a deformarlas, por lo menos de una manera temporal, si estas paredes son suficientemente elásticas. Una propiedad análoga se ha empleado en particular en el termómetro de inscripción de Richard, que representa esquemáticamente la figura 122. Consta de un depósito metálico T, de sección elíptica y ligeramente curvado en el sentido longitudinal, lleno de petróleo; un sistema de brazos P, Q, R, transmite los desplazamientos de un tubo T, amplificándolos, a un estilete S provisto de una pluma que traza los valores de la temperatura sobre el papel de un tambor A que gira con movimiento continuo.

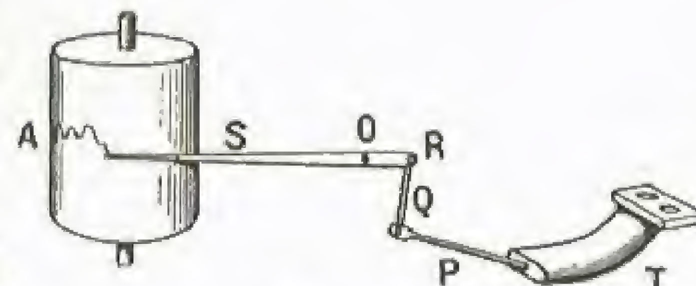


Fig. 122

Medida de las cantidades de calor
Calorimetría

Reseña histórica. Definiciones. Métodos calorimétricos. Medida del calor específico de un sólido o de un líquido por el método de las mezclas. Método de fusión del hielo. Método eléctrico. Resultados. Ley de Dulong y Petit. Calores específicos de los gases. Relación de Mayer. Aplicaciones del calorímetro en química. Bomba calorimétrica

Reseña histórica. — **Boyle** observó, hacia 1665, que el agua tibia hierve en el vacío con gran facilidad y que, por consiguiente, la presión del aire hace variar las propiedades de los cuerpos, que no son las mismas en las llanuras que en las montañas. **Papin** (1674-1714) generalizó estos resultados algún tiempo después, y **Halley,** en 1693, fue quien primero observó que la temperatura del agua permanecía constante durante todo el tiempo de ebullición, observación que condujo a la noción de calor latente, descubierta por **Black** (1728-1799) en 1762. Según Black, los cuerpos absorben calor porque se combinan con el calórico.

La noción de calor específico fue dilucidada en la misma época por **Wilcke** (1772), basándose en las observaciones de Black (1763).

Entonces nació la calorimetría. **Lavoisier** y **Laplace** idearon el primer calorímetro de hielo; el último que se conoce es el que construyó **Bunsen** (1811-1899) en 1870.

Los calorímetros que se emplean actualmente para el método de las mezclas se deben a mejoras introducidas en el dispositivo de Black por **Rumford** (1812), **Dulong** y **Petit** (1818), **Regnault** (1840) y **Berthelot** (1865).

Dulong y Petit establecieron, en 1819, la conocida ley sobre los calores específicos y las masas atómicas.

Definiciones. — Según aumente o disminuya la temperatura de un cuerpo, se dice que este cuerpo ha recibido o cedido cierta *cantidad de calor.* Por definición, la cantidad de calor recibida por un cuerpo puro es proporcional a la masa de este cuerpo, sobre la cual produce una variación de temperatura determinada; así, para calentar dos gramos de agua de 10° C a 15° C, hay que proporcionar dos veces más de calor que para elevar la temperatura de un gramo de agua entre los mismos límites.

La unidad relativa a esta magnitud es la cantidad de calor necesaria para elevar de 14°5 C a 15°5 C la temperatura de una masa de agua igual a la unidad. Para una tonelada de agua (sistema M.T.S.), esta unidad es la **termia** (tr); para un gramo (sistema C.G.S.), la **caloría pequeña** o **caloría gramo,** y para un kilogramo (sistema M.K.S.), la **caloría grande** o **kilocaloría.** Como estas cantidades de calor son proporcionales a las masas, la kilocaloría es también una *militermia* y la caloría pequeña es una *microtermia* (10^{-6} termias). Observemos también que el calor, por ser una forma de energía, puede evaluarse en unidades energéticas. El **joule,** unidad legal de cantidad de calor, vale $\frac{1}{4,185}$ caloría-gramo.

En primera aproximación, puede admitirse que la cantidad de calor necesaria para elevar un grado la temperatura de una masa de agua no depende de su temperatura inicial. Podrá escribirse que para que una masa M de agua pase de la temperatura t a la temperatura t' habrá que proporcionarle una cantidad de calor

$$Q = M\,(t' - t).$$

Muestra la experiencia que la cantidad de calor necesaria para que la temperatura de la unidad de masa de un cuerpo puro diferente del agua ascienda de t a t', depende de la naturaleza de este cuerpo. De aquí la definición de *calor específico,* numéricamente igual a la cantidad de calor necesaria para elevar un grado la temperatura de la unidad de masa del cuerpo considerado. De una manera más precisa, se dice que la cantidad de calor que hay que proporcionar a la masa m de un cuerpo puro para que su temperatura varíe de t a t' viene expresada por la fórmula

$$Q = mc\,(t' - t),$$

en donde c es igual al calor específico medio entre t y t'. Comparando ambas fórmulas se pone de manifiesto que la cantidad

$$M = mc,$$

llamada *capacidad calorífica* o *valor en agua* del cuerpo considerado, representa la masa de agua equivalente.

Es importante observar que la adquisición de cierta cantidad de calor por un cuerpo no corresponde siempre a una elevación de temperatura. Por ejemplo, mientras dura el fenómeno de fusión o de ebullición de un cuerpo, la temperatura permanece constante, aunque continúe proporcionándose calor. Existe, pues, un calor latente de fusión o de vaporización igual a la cantidad de calor que produce, a temperatura y presión constantes, el cambio de estado de la unidad de masa.

Métodos calorimétricos. — La calorimetría es la parte de la física que trata de la medida de las cantidades de calor que intervienen en los diversos fenómenos, y utiliza principalmente tres métodos:

1° En el *método de las mezclas* o *métodos adiabático,* la cantidad de calor —positiva o negativa— que hay que medir se desprende de una masa de agua M, cuya temperatura se eleva (o desciende) de t a t'. La expresión de esta cantidad de calor será

$$Q = M\,(t' - t).$$

2° En el *método de fusión del hielo* o *método isotérmico,* esta cantidad de calor sirve para fundir cierta masa de hielo, que le es proporcional, calculándose la disminución de volumen del hielo fundente.

3° En el *método eléctrico,* el paso de una corriente a través de un conductor desprende una cantidad de calor determinada, dada *a priori*; esta cantidad de calor sirve para producir el efecto que se quiere estudiar, por ejemplo, una variación de temperatura, y es expresada por la conocida fórmula

$$Q = \frac{1}{4,185} \cdot ri^2x,$$

donde x es el tiempo, i la intensidad de la corriente y r la resistencia del conductor.

Medida del calor específico de un sólido o de un líquido por el método de las mezclas. — El cuerpo, sólido o líquido, de masa m, cuyo calor específico c quiere medirse, se mantiene a una temperatura constante T bien determinada durante un tiempo suficiente para que su temperatura propia sea la misma que la del recinto caliente en el que se ha colocado. Se utiliza frecuentemente para ello una estufa de punto 100. Se emplea además un calorímetro, que es un vaso que contiene una cantidad de agua M, provisto de un agitador destinado a uniformizar la temperatura, y de un termómetro. Si t es la temperatura inicial del conjunto, se sumerge en el agua el cuerpo calentado a la temperatura T, que se supone superior a t. Se verifica entonces un cambio de calor: el cuerpo caliente se enfría, cediendo calor al calorímetro, que a su vez se calienta. El equilibrio térmico se alcanza cuando éste adquiere una temperatura invariable t', que es también la temperatura final del cuerpo sumergido. Se escribirá entonces que el calor cedido por el cuerpo inicialmente caliente es igual al calor ganado por el calorímetro. Designando por M′ la capacidad calorífica total del vaso calorimétrico y de sus accesorios (agitador y termómetro), se tendrá la ecuación

$$mc\,(T - t') = (M + M')\,(t' - t),$$

que permite calcular c.

Este método da por sentado que no ha habido cambio de calor entre el calorímetro y el medio ambiente; de ahí su nombre de método "adiabático" (sin cambio de calor). Para que así ocurra, debe construirse el calorímetro con el propósito de evitar estos cambios, que pueden ocurrir por conducción, radiación y convección. Se utiliza frecuentemente el aparato ideado por Berthelot (*fig.* 123), que se compone de un vaso interior B colocado dentro de un segundo vaso D, ambos metálicos, y lo más ligeros posible, con objeto de que su capacidad calorífica sea pequeña. El vaso B se apoya en cuñas aislantes ligeras que lo aislan del vaso D, de forma que los puntos de contacto sólo transmitan la menor cantidad de calor. El exterior del vaso B y el interior del vaso D están pulimentados de forma que los cambios por radiación se reduzcan al mínimo. Estos dos vasos, provistos de un termómetro sensible T y de un agitador A, constituyen el calorímetro propiamente dicho.

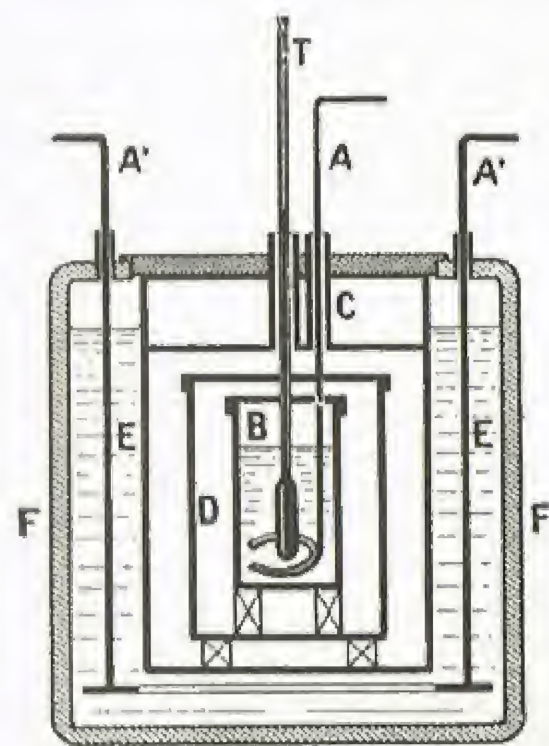


Fig. 123

Para que el conjunto esté al abrigo de las variaciones de la temperatura exterior y de la corriente del aire, se coloca en el interior de un cilindro de pared doble que contiene agua, E, y cuya superficie exterior está protegida por un fieltro espeso, F; también contiene un agitador A'A' que permite mantener la temperatura del agua continuamente uniforme. Esta doble envoltura tiene por objeto que el calorímetro se conserve en condiciones constantes de irradiación al exterior, incluso durante una medida de cierta duración. Una tapadera C, con orificios para el termómetro y para la varilla del agitador A, cierra la cubeta exterior.

Este aparato se perfecciona reemplazando los vasos B y D por vasos de Dewar, de pared doble plateada, en cuyo interior se ha hecho el vacío.

En las medidas de precisión, no son de despreciar los cambios de calor entre el calorímetro y el medio ambiente (pérdidas térmicas), y para tenerlos en cuenta se introducen correcciones en la ecuación calorimétrica anterior. Con este objeto, independientemente de la propia experiencia, se examinan cada minuto las variaciones de temperatura del calorímetro debidas exclusivamente a estos cambios. Entonces se podrá calcular la temperatura final corregida, es decir, la que tendría el calorímetro al final de la experiencia si se hubieran podido suprimir las pérdidas térmicas.

Estas pérdidas aumentan con la diferencia entre la temperatura del calorímetro y la del medio ambiente. Conviene, pues, que esta diferencia sea pequeña y que, por consiguiente, la temperatura del calorímetro varíe poco en el transcurso de la experiencia.

Por ello conviene emplear termómetros muy sensibles, que den el 1/25 ó el 1/50 de grado por lectura directa. Estos termómetros tienen un depósito grande lleno de mercurio; su capacidad calorífica no es despreciable y debe ser determinada cuidadosamente. En las medidas de alta precisión se utilizan pares termoeléctricos.

Método de fusión del hielo. — Bunsen imaginó un calorímetro muy ingenioso que permite medidas rápidas, basado en la disminución de volumen que sufre el hielo durante su fusión.

El aparato se compone de un depósito A (*fig.* 124) en cuyo interior se ha soldado un tubo de ensayo B que sirve de laboratorio, y que está abierto por su parte superior. El depósito A acaba por su parte inferior en un tubo CD que se prolonga por un tubo capilar horizontal E. El depósito A está completamente lleno de agua destilada que flota sobre el mercurio que llena los tubos C y D; el extremo de la columna del mercurio se termina en el tubo E, graduado en milímetros. Todo el conjunto ABCD está sumergido en una caja que contiene materias aislantes para mantener constante la temperatura.

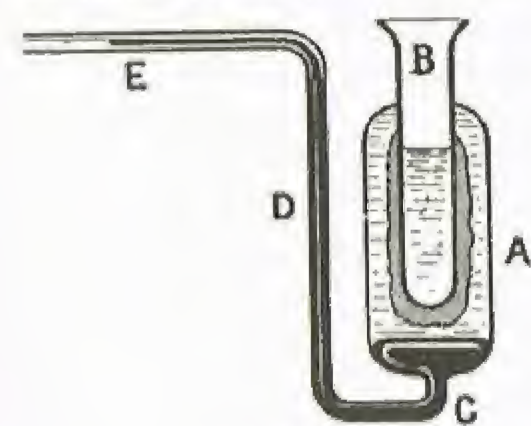


Fig. 124

Al introducir en el laboratorio B una mezcla refrigerante, o mejor todavía, un cuerpo fácilmente volátil, como el cloruro de metilo, disminuye la temperatura y se forma en la superficie exterior de B una capa de hielo; en este momento se produce un aumento de volumen y un desplazamiento del mercurio en la columna E, hasta que el sistema haya llegado a su equilibrio de temperatura a 0° C. Se introduce entonces en el laboratorio el cuerpo cuyo calor específico nos proponemos determinar, después de que haya alcanzado una temperatura determinada, t, y se sigue el desplazamiento del mercurio en el tubo E.

Cada caloría cedida por el cuerpo caliente funde una masa de hielo determinada, fusión que produce una variación de volumen que se mide en la graduación, correspondiendo cada división a un número de calorías determinado.

En otros términos: si m es la masa del sólido o del líquido introducido a la temperatura t, la cantidad de calor que éste cede al calorímetro al enfriarse a 0° C, mct, por ejemplo, es proporcional al número de divisiones n que el mercurio retrocede en la varilla:

$$mct = kn.$$

El coeficiente k del aparato se determina por una experiencia en la que se utiliza una cantidad de agua conocida; por ejemplo, vertiendo agua caliente en el calorímetro.

Método eléctrico. — Este método fue ideado por Nernst para la determinación de los calores específicos a bajas temperaturas. El calorímetro, cuyo valor total en agua es M, lleva una resistencia por la que pasa una corriente, y en la que se coloca el cuerpo de masa m cuyo calor epecífico se desea medir. Si V e I son respectivamente, la tensión en los bornes de la resistencia y la intensidad de la corriente, supuestas ambas constantes durante el intervalo de tiempo pequeño Δx, el calor que se desprende durante este intervalo será

$$\Delta Q = \frac{1}{4{,}185} VI\Delta x$$

y el calor total desprendido durante la experiencia

$$Q = \frac{1}{4{,}185} \Sigma VI\Delta x.$$

Esta cantidad de calor sirve para que la temperatura del calorímetro y de su contenido ascienda de t a t'; por consiguiente, podrá escribirse

$$Q = (M + mc)(t' - t).$$

Las temperaturas t y t' pueden obtenerse, por el método del bolómetro (v. p. 35) del valor $r = \frac{V}{I}$ de la resistencia que lleva el calorímetro.

Resultados. — En general, los calores específicos, que se consideran constantes mientras las diferencias de temperatura no son demasiado elevadas, no pueden considerarse como tales cuando dichas diferencias se hacen más grandes. Entonces deben representarse sus valores por una función como

$$C_t = a + bt + ct^2.$$

Basta emplear los dos primeros términos para los sólidos en general, pero para representar el valor del calor específico de un líquido, con aproximación suficiente, hay que añadir el término ct^2.

El calor específico del platino es dado, según Violle, por

$$C = 0{,}0317 + 0{,}000012\ t.$$

Mientras que para el agua hay que emplear

$$C = 1 - 0{,}0004\ (t - 15) + 0{,}000012\ (t - 15)^2,$$

reduciendo las temperaturas a la de 15° C, puesto que se ha admitido que el calor específico del agua a 15° C era igual a la unidad.

La variación que sufren los calores específicos de los sólidos en función de la temperatura se indica en el cuadro que figura a continuación, debido a Dulong y Petit, y que da los valores medios para diferentes cuerpos entre 0 y 100° y entre 0 y 200°:

	DE 0° C A 100° C	DE 0° C A 200° C
Hierro	0,1088	0,1218
Mercurio	0,0330	0,0350
Cinc	0,0927	0,1015
Antimonio	0,0507	0,0549
Plata	0,0557	0,0611
Cobre	0,0949	0,1013
Vidrio	0,0170	0,1900

Regnault dio un cuadro de coeficientes a, b y c de la fórmula anterior para determinado número de líquidos; estos coeficientes se expresan por sus logaritmos:

	LOG a	LOG b	LOG c
Esencia de trementina ...	1,6833977	4,7919279	6,1229947
Alcohol	1,7384166	3,0499296	6,3436027
Sulfuro de carbono ...	1,3714961	5,9112397	»
Eter	1,7234538	4,4711026	»
Cloroformo	1,3661435	5,7051430	»
Acetona	1,7045201	4,5982214	»

Para los sólidos, el calor específico depende esencialmente de su estado físico, y ciertas substancias que poseen varios estados alotrópicos muestran diferencias bastante grandes que Regnault puso de manifiesto, particularmente en cuanto al carbón y el azufre; a continuación se indican estos valores:

		c
Carbono	Carbón animal	0,261
	— de madera	0,241
	— de retorta	0,204
	Grafito	0,202
	Coque de hulla	0,201
	Diamante	0,147

		c
Azufre	natural cristalizado	0,1776
	a los dos años de su fusión ...	0,1764
	a los dos meses de su fusión ...	0,1803
	fundido recientemente	0,1844

Ley de Dulong y Petit. — Según esta ley, la capacidad calorífica de los átomos de los cuerpos sólidos es un número constante, es decir, que *el producto de la masa atómica A de un cuerpo simple en el estado sólido por su calor específico c es, aproximadamente, 6,4.*

Esta ley, bastante exacta con muchos metales, falla en otros casos. He aquí los resultados encontrados para los principales metales:

	c	A	Ac
Plata	0,0570	108,0	6,16
Aluminio	0,2143	27,4	5,87
Cobre	0,0949	63,4	6,02
Hierro	0,1138	56,0	6,37
Plomo	0,0314	207,0	6,50

En cambio, ciertos cuerpos simples cristalizados, como el carbono (diamante), el azufre, el boro, etc., dan para el producto *Ac* valores muy diferentes de 6,4. La ley de Dulong y Petit es tanto más exacta cuanto más elevadas son las temperaturas. Existe, al parecer, para todos los cuerpos, una temperatura para la cual el calor específico es muy aproximadamente un valor constante; no obstante, la temperatura a la que puede hacerse esta observación, que es bastante baja para la mayor parte de los metales, parece ser mucho más elevada para otros cuerpos simples, que son precisamente los que no siguen esta ley.

Calores específicos de los gases. — Mientras que la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de un sólido o un líquido de t a t' está bien determinada, porque estos cuerpos son prácticamente incompresibles, no puede definirse la misma cantidad para un gas, porque depende de la forma como el gas se ha calentado. Se considera, pues, para los gases, como se ha hecho para la dilataciones, dos calores específicos, según que el calentamiento se produzca a *volumen constante* o a *presión constante.*

Supongamos un recipiente cerrado, de volumen invariable, que contiene una masa m de gas. Para que la temperatura del gas se eleve de t a t' habrá que proporcionarle una cantidad de calor

$$q = mc\,(t' - t).$$

c es entonces el calor específico del gas a volumen constante. La presión del gas a la nueva temperatura es superior a la presión de origen, y si se expande el gas para reducir la presión a su valor primitivo, se produce en la masa un enfriamiento que exigirá se aporte una nueva cantidad de calor q', para que la temperatura se mantenga constante, y el total de calor proporcionado será $q + q'$. Por consiguiente, el calor específico C, a presión constante, es mayor que el calor c a volumen constante.

Las medidas clásicas de Delaroche y Bérard, y la de Regnault, del calor específico de los gases a presión constante C, consistían en producir una corriente gaseosa a velocidad constante y medible: el gas pasaba por un baño caliente que lo ponía a una temperatura conocida y después a un calorímetro que rebajaba esta temperatura. Entonces se aplicaba el método de las mezclas para calcular el calor específico del gas.

Se obtuvieron los valores que se indican a continuación:

CALORES ESPECÍFICOS A PRESIÓN CONSTANTE

Aire	0,237	Anhídrido carbónico ...	0,217
Oxígeno	0,217	óxido de carbono	0,245
Hidrógeno	3.409	Protóxido de nitrógeno.	0,226
Nitrógeno	0,244	Bióxido de nitrógeno.	0,232
Cloro	0,121	Anhídrido sulfuroso ...	0,154
Bromo	0,055	Amoniaco	0,508

Para los gases que cumplen la ley de Boyle-Mariotte, es decir, que están a una temperatura bastante por encima de su punto de licuefacción, el calor específico es poco más o menos independiente de la temperatura. Regnault dedujo de estas observaciones que era igualmente independiente de la presión, pero resultados más recientes han demostrado que para presiones bastante elevadas —del orden de 100 atmósferas— hay una variación no despreciable.

Delaroche y Bérard han enunciado la ley según la cual los gases cuya molécula consta de dos átomos y los que se producen sin contracción de volumen tienen un calor específico a presión constante C tal, que el producto de C por la masa molecular M es un número constante igual a 6,8.

El calor específico de los gases a volumen constante c no se presta, por falta de sensibilidad de los métodos calorimétricos, a medidas directas fáciles. La determinación de los calores c se deduce con la mayor frecuencia del valor de C y del cociente $\frac{C}{c}$, que se puede obtener directamente de la experiencia.

Determinación de $\gamma = \frac{C}{c}$. — **Clément** y **Desormes** idearon un método simple y rápido para medir la relación $\frac{C}{c}$ de los calores específicos de los gases a presión y a volumen constantes. El aparato empleado se compone de un balón A (*fig.* 125) de gran dimensión provisto de un paso R de gran abertura que permite poner el interior del balón en contacto directo con la atmósfera. Un tubo lateral t, cerrado por una llave de paso r, está conectado a una bomba que produce un vacío parcial del aire del balón A. La presión se mide por un manómetro de líquido formado por el tubo m, provisto de una graduación, y sumergido en un vaso v con agua u otro líquido.

La medida se hace de la forma siguiente: se produce una depresión del gas contenido en el balón A abriendo la llave de paso r, que se cierra después, y se anota el desnivel a del líquido en el tubo del manómetro. La presión es entonces (H — a), siendo H la presión atmosférica. Se abre entonces bruscamente, y durante muy breve tiempo, la llave de paso R. El interior del balón aspira una cantidad de aire que aumenta su presión equilibrándola con la atmosférica. Pero, a causa de la compresión del gas contenido antes de abrir el balón, se produce un calentamiento. El gas se enfriará entonces, alcanzando después de nuevo la temperatura ambiente, y el manómetro vuelve a ascender después del cierre a una altura b.

Fig. 125

El cálculo muestra entonces que

$$\frac{C}{c} = \gamma = \frac{a}{a - b}.$$

Para el aire se encuentra:

$$\gamma = 1{,}40.$$

Este valor es común a todos los gases diatómicos. Cuando aumenta la atomicidad de un gas, γ decrece y se aproxima a 1.

La medida del coeficiente γ para los diferentes gases permite determinar su atomicidad, siendo sus valores:

De 1,67 para los gases monoatómicos (argón, helio);
De 1,40 — diatómicos (hidrógeno, oxígeno);
De 1,33 — triatómicos (anhídrido carbónico, protóxido de nitrógeno, etc.).

También puede determinarse γ mediante la medida de la velocidad de propagación del sonido en los gases.

Relación de Mayer. — Esta relación, establecida teóricamente por el alemán Robert von Mayer (v. pág. 57), es válida para los gases perfectos; los gases reales la siguen aproximadamente cuando están muy alejados de su punto de licuefacción. Si M designa la masa molecular de un gas, esta relación se expresa

$$MC - Mc = 2.$$

La comparación de esta relación con los valores de γ dados anteriormente muestra que se tiene aproximadamente:

Para los gases monoatómicos, MC = 5, Mc = 3;
Para los gases diatómicos, MC = 7, Mc = 5...

Por ejemplo, para los gases que se indican en el cuadro siguiente, se tendrá:

GAS	C	c	M	MC — Mc
Hidrógeno H_2	3,4	1,40	2	2,06
Oxígeno O_2	0,217	0,155	32	1,98
Anhídrido carbónico CO_2	0,217	0,156	44	2,68

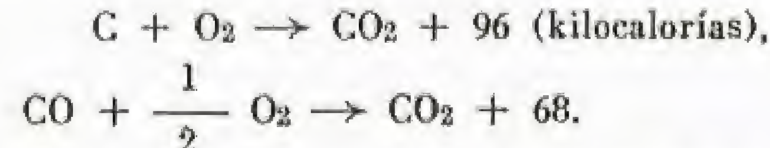
Aplicaciones del calorímetro en química. — La mayoría de las reacciones químicas se producen con desprendimiento o con absorción de calor, por lo que se dividen, respectivamente, en *reacciones exotérmicas* y *endotérmicas*, según que haya calentamiento o enfriamiento durante la reacción.

El estudio de este fenómeno constituye la rama denominada termoquímica, a la que se han consagrado trabajos muy importantes a finales del último siglo y a principios del actual.

La termoquímica se basa en la ley de Hess, caso particular del principio de los estados inicial y final, que la experiencia justifica. Su enunciado es el siguiente:

La cantidad de calor que se desprende al pasar de un sistema A de substancias a otro sistema B es independiente de la forma en que se produce el paso y de las reacciones intermediarias, siempre que el estado físico de los sistemas A y B sea el mismo en todos los casos. Esta ley no es realmente válida más que si las transformaciones ocurren a volumen constante o a presión constante.

Determinemos, a título de ejemplo, el calor de formación del óxido de carbono, a partir del carbono y del oxígeno. Por observación directa se encuentra:



$$C + O_2 \rightarrow CO_2 + 96 \text{ (kilocalorías)},$$

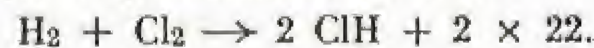
$$CO + \frac{1}{2}\,O_2 \rightarrow CO_2 + 68.$$

Según la ley de Hess, se debe tener el mismo resultado para el calor de formación de CO_2 operando con $C + O_2$, u operando en dos tiempos: $C + \frac{1}{2}\,O_2$ y $CO + \frac{1}{2}\,O_2$. Si la cantidad de calor que se busca y que representa la formación de CO es x, se tendrá

$$x = 96 - 68 = 28.$$

Se llega al mismo valor por formación directa de CO.

Consideremos ahora el caso de la combinación del hidrógeno con el cloro, que da ácido clorhídrico ClH, cuerpo también gaseoso. La reacción se desarrolla con desprendimiento de calor:



$$H_2 + Cl_2 \rightarrow 2\,ClH + 2 \times 22.$$

Se tendrá igualmente



$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O + 58,$$

cuando el agua que se forma está, como el hidrógeno y el oxígeno, en estado gaseoso. Si la presión y la temperatura al final de la combinación son tales que el agua está en estado líquido, deberá restarse la cantidad de calor necesaria para vaporizar una molécula de agua del valor hallado. Esta diferencia dará, por otra parte, y de acuerdo con la ley de Hess, el mismo valor —58 kcal— para el calor de formación de agua en estado gaseoso.

Los resultados obtenidos por los diferentes experimentadores se han reunido en tablas de calores de formación de gran número de cuerpos conocidos a partir de sus elementos y de calores de hidratación y de disolución de estos cuerpos en el agua. Mediante el empleo de tales tablas es posible estudiar los cuerpos nuevos utilizando los datos establecidos anteriormente por los fundadores de la termoquímica y efectuando sólo un número limitado de determinaciones.

Cuando los cuerpos empleados por la reacción son solubles en el agua o están en estado líquido, las medidas se hacen con el calorímetro ordinario antes descrito, completándolo, si es útil, con los dispositivos necesarios para introducir, en el momento deseado, el cuerpo que deba actuar sobre el que está colocado dentro del calorímetro, una vez que ambas partes han alcanzado su temperatura común de equilibrio.

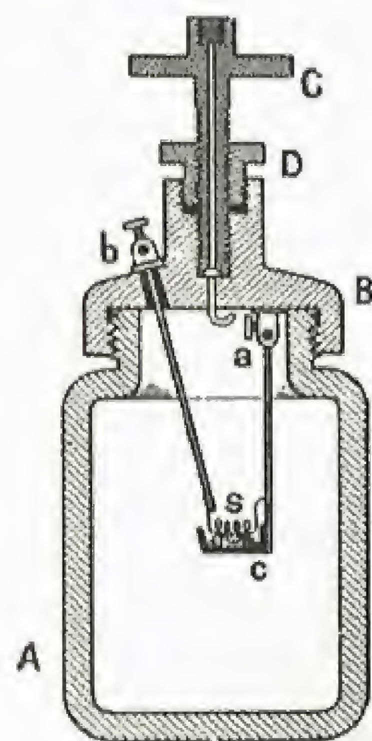


Fig. 126

Bomba calorimétrica. — Cuando uno o ambos cuerpos se encuentran en estado gaseoso, puede emplearse el dispositivo de la bomba calorimétrica ideado por Berthelot, en la forma práctica realizada por Mahler.

Se compone (*fig.* 126) de una botella A de acero, esmaltada interiormente, cerrada por su Este tapón lleva en su centro una pieza fileteada parte superior con un tapón ancho de rosca B. C, que sirve para introducir a presión el gas en la bomba. Un prensaestopas D sirve de protección contra los escapes. En la parte inferior de la tapadera se fijan dos bornes *a* y *b*; el borne *a*, en contacto con la masa, permite fijar una pequeña cúpula *c* de platino en la que se coloca la substancia con que se experimenta; el borne *b* está unido, en el interior, a la extremidad de una espiral de platino de diámetro pequeño, destinada al encendido de la substancia contenida en la cúpula, por medio de una corriente eléctrica que la atraviesa durante un instante muy breve.

La bomba calorimétrica se emplea muy frecuentemente para determinar el calor de combustión de los cuerpos en el oxígeno. Para ello, se coloca en la cúpula cierta cantidad de la substancia sólida o del líquido por estudiar y se cierra la botella herméticamente; entonces se introduce el oxígeno a presión por el orificio de la pieza C, que se atornilla después a fondo, una vez acabada la carga, con lo que el aparato está dispuesto para la medida. Se le coloca en un calorímetro de agua, cuya temperatura se observa, hasta que alcance el equilibrio *t*. Se hace pasar una corriente eléctrica por la espiral *s*, la substancia de la cúpula arde y se observa el calentamiento del agua del calorímetro, que alcanza la temperatura T. La diferencia (T — *t*) permite calcular, como ya se ha visto, la cantidad de calor desprendido.

Este aparato permite determinar industrialmente el valor de los diversos combustibles, por la magnitud de lo que se denomina su *poder calorífico*, es decir, la cantidad de calor que proporciona la combustión de un kilogramo de la substancia. He aquí el orden de magnitud del poder calorífico de diversas materias:

Petróleo	10 000 kilocalorías
Hulla	8 000
Coque	7 000
Alcohol	5 000
Madera	3 000

La ley de Hess permite calcular el calor de formación de las substancias orgánicas combustibles determinando su calor de combustión.

Por ejemplo, la combustión de una molécula-gramo de alcohol etílico C_2H_6O produce Q = 340 kilocalorías; pero como se conoce el calor de combustión de un átomo-gramo de carbono, que es 96, y el de un átomo-gramo de hidrógeno, 29, se puede calcular la suma de los calores de combustión de los elementos que integran una molécula de alcohol:

$$Q' = 96 \times 2 + 29 \times 6 = 366.$$

El calor de formación del alcohol etílico será, pues,

$$q = Q' - Q = 366 - 340 = 26 \text{ kilocalorías.}$$

Cambios de estado - Calores latentes

Reseña histórica. Los diferentes estados. Fusión y solidificación. Sobrefusión. Puntos de fusión y presión. Medida de las temperaturas de fusión. Calor latente de fusión. Vaporización. Densidad de los vapores. Ebullición. Ley de la ebullición. Medida de las temperaturas de ebullición. Calor latente de vaporización. Condensación de los vapores. Destilación. Destilación fraccionada. Ebullición de una mezcla de dos líquidos. Aceotropía. Sublimación. Punto triple. Punto crítico. Continuidad de los estados líquido y gaseoso. Estados correspondientes. — **Licuefacción de los gases:** Reseña histórica. Licuefacción de los gases. Aire líquido por la máquina de Linde. Aplicaciones de los gases liquidados. — **Higrometría:** Mezcla de gas y vapor. Humedad de la atmósfera. Higrómetros: Aparatos de punto de rocío. Psicrómetros. Higrómetros capilares

Reseña histórica. — Ya en el siglo XVIII se reconoce que los cambios de estado son fenómenos absolutamente generales y que un mismo cuerpo puede adoptar los tres estados: sólido, líquido y gaseoso (**Lavoisier**).

En el siglo XIX se trató de comprobar esta ley, consagrando los físicos sus esfuerzos a la licuefacción de los gases y a la fusión de los sólidos. En 1850 quedaban cinco gases por liquidar, y en 1860, después de los trabajos de **Sainte-Claire Deville** (1818-1881) sobre el platino, sólo algunos sólidos no habían podido fundirse (cuerpos refractarios). En el momento actual ya no existen gases permanentes ni cuerpos refractarios. El calor de fusión del hielo fue determinado por **Desains** (1817-1885) y **de La Provostaye,** y después por **Regnault.** El estudio de la fusión de los cuerpos en función de la presión fue llevado a cabo por **William Thomson, Bunsen** (1850) y **Hopkins** (1854). **Amagat** (1841-1915) fue quien primeramente obtuvo y midió altas presiones en un laboratorio. También merecen citarse los trabajos de **Tyndall** (1871) sobre el rehielo.

Watt (1736-1819), **Schmidt, Dalton** (1766-1844), **Gay-Lussac** (1778-1850), **Biot** (1774-1862), **Dulong, Arago** (1786-1853), **Regnault** (1848), **Holborn** y **Henning** (1908) estudiaron los equilibrios de los líquidos y de sus vapores.

En relación con la vaporización, merecen citarse **Black, Watt, Rumford, Despretz** (1791-1863), **Clément** (¿1779?-1842), **Desormes** y **Regnault** (1847).

Los diferentes estados. — Al variar la temperatura o la presión, todos los cuerpos sufren modificaciones internas denominadas cambios de estado. Los principales estados, de los que ya se ha hablado, son: el sólido, el líquido y el gaseoso. Pero estos cambios no son los únicos, sino sólo los más aparentes.

En el estado sólido debe distinguirse el amorfo y el cristalino. Los cuerpos pueden adoptar, según las condiciones generales de presión y de temperatura y el proceso seguido en el modo de transformación, diversas formas cristalinas, que adopta con frecuencia un mismo cuerpo, o un estado amorfo en el cual las partículas que lo componen carecen de orientación de conjunto unas respecto a otras. Este estado amorfo se parece al estado líquido o al gaseoso, en los cuales las moléculas gozan de una libertad de movimientos mucho mayor que en el estado sólido y en el que no puede subsistir un determinado orden geométrico.

Todos estos cambios se manifiestan en el exterior, no sólo por los caracteres propios de cada uno de los estados, sino también por el desprendimiento o la absorción de calor, que se produce desde el principio del cambio de estado, y que persiste durante toda su duración y cesa al propio tiempo que él.

Las cantidades de calor ganadas o perdidas por el cuerpo durante estas transformaciones se denominan *calores latentes;* éstas pasan inadvertidas en los cuerpos y sólo aparecen durante la transformación. Se conocen principalmente los calores latentes de *fusión* o de *solidificación*, así como los de *vaporización* o de *licuefacción;* sus valores son con frecuencia elevados, y desempeñan un papel importante en las aplicaciones del calor y del frío, porque bastan pequeñas variaciones de temperatura para que se disponga de importantes cantidades de calor.

En general, los cambios de estado, que se producen a medida que aumenta la temperatura a presión constante o que disminuye la presión a temperatura constante, van acompañados por una varición de volumen, que aumenta. Los mismos estados sucesivos, pero obtenidos en orden inverso, dan las mismas variaciones de volumen, pero contrarias, es decir, un aumento de densidad.

Existen, no obstante, algunas excepciones a esta regla general, siendo la más importante la del agua, ya indicada. Es, sin embargo, lógico pensar que esta variación anormal de volumen no se debe a la propia fusión, sino a una transformación alotrópica que se produce progresivamente en el agua líquida, comenzando antes de su solidificación y superponiéndose al fenómeno de congelación.

Fusión y solidificación. — La fusión de un cuerpo puro cristalizado o la solidificación del mismo cuerpo en estado líquido, a una presión determinada, comienza a una temperatura fija denominada *temperatura de fusión*, que se mantiene constante hasta que la totalidad del cuerpo adquiere el nuevo estado.

La temperatura de fusión de los cuerpos puros a una presión fija es una de las constantes específicas de la materia, que permite fijar su naturaleza y caracterizarla. A título de ejemplo, indiquemos los valores de la temperatura de fusión, t_f, de algunos cuerpos:

Mercurio	$t_f = -39°$ C
Agua	0° C
Fósforo blanco	+ 43° C
Azufre	113° C
Estaño	232° C
Plomo	327° C
Cinc	419° C
Plata	960° C
Oro	1 063° C
Platino	1 755° C

El hecho de que la temperatura permanece constante durante todo el tiempo que dura la fusión o la solidificación, se pone en evidencia si se construye la curva de las temperaturas en función del volumen del cuerpo.

Se parte del volumen v (*fig.* 127) de un cuerpo sólido a una temperatura inicial t, y se eleva progresivamente dicha temperatura; se observa entonces que el volumen aumenta regularmente según una curva ascendente AB hasta un valor t_f, que corresponde a la temperatura de fusión, y que indica el comienzo de este fenómeno. La temperatura permanece entonces constante, mientras que el volumen crece hasta el punto C, en que toda la substancia se funde. Por encima de C, toda la masa es líquida, y se reanuda la curva ascendente CD al aumentar la temperatura al mismo tiempo que el volumen. En la transformación pueden, pues, distinguirse tres fases bien diferentes: 1°, curva AB, que corresponde a la fase sólida del cuerpo; 2°, recta BC, que corresponde a la substancia en parte sólida y en parte fundida, yendo en aumento la parte líquida desde B hacia C; 3°, curva CD, que corresponde a la fase en que la materia es completamente líquida.

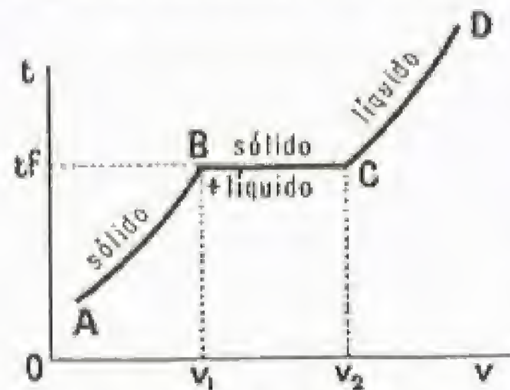


Fig. 127

Para que la substancia empleada en la experiencia aumente constantemente de volumen de A a D, es necesario que se prosiga el calentamiento sin discontinuidad, por lo que no podría concebirse que la temperatura permaneciera constante durante el período BC de fusión si el calor absorbido no se utilizara para producir esta variación del volumen; la fusión absorbe, pues, una cierta cantidad de calor.

La fusión de un cuerpo va siempre acompañada por una variación de volumen, por lo general un aumento, por ser la densidad del estado líquido inferior a la del sólido.

Existen varias excepciones a esta regla; una de ellas, ya indicada al tratar de las dilataciones, es muy importante por tratarse de un cuerpo de los más abundantes: el agua. La curva temperatura-volumen del agua presenta, en efecto, una forma diferente de la anterior (*fig.* 128). Partiendo del hielo a una temperatura inferior a 0° C, si se calienta de manera constante, habrá al principio dilatación del hielo de A a B, y después comienza la fusión, que continúa hasta C, a temperatura constante (0° C), al propio tiempo que el cuerpo se contrae. En el punto C, la totalidad del agua es líquida y después el volumen líquido comienza a disminuir un poco, aunque aumenta su temperatura, creciendo después gradualmente hasta D. En el punto M hay un mínimo de volumen (4° C).

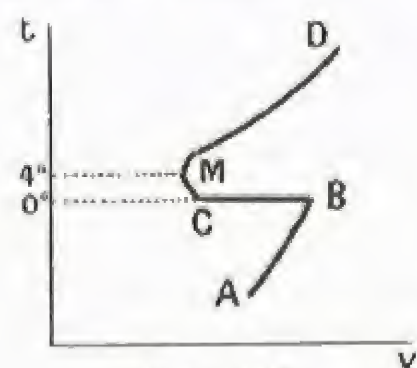


Fig. 128

Todo lo que se ha dicho de la fusión de los cuerpos puros se aplica, en sentido inverso, a la solidificación de los líquidos por enfriamiento. Las curvas temperatura-volumen son las mismas, ya sean recorridas desde las temperaturas elevadas hacia las más bajas o en sentido contrario. Durante el fenómeno de solidificación vuelve a encontrarse el rellano de la curva que corresponde a una temperatura constante mientras dura la solidificación; el calor necesario para sobrepasarlo es del mismo valor que el de fusión, pero negativo en este caso.

Hasta ahora sólo se ha hablado de los fenómenos que ocurren durante la fusión y la solidificación de los cuerpos puros. Si la materia considerada es una mezcla, los caracteres de la curva de fusión cambian; la temperatura ya no es constante durante la fusión, sino que su valor aumenta con más lentitud; el principio y el fin de la fusión dependen de la composición de la mezcla. La curva de fusión sólo indica, en realidad, una deformación de la curva, que persiste durante una variación de volumen mayor o menor, pero con una variación concomitante de la temperatura, aunque esta variación sea menos rápida que antes y después del paso que corresponde a la fusión. Se observan a veces varios de estos pasos de transformación, que deben proceder de la fusión sucesiva de los cuerpos que constituyen la mezcla.

Por una causa sin duda análoga, ciertas materias vítreas, o en todo caso amorfas, muestran diferencias considerables de temperatura entre el principio y el fin de la fusión. En realidad, no sabría decirse con precisión cuándo comienza y acaba la fusión, tanto a causa de las continuas modificaciones que sufre la materia, como por no observarse en este caso que la materia sea una mezcla de sólido y líquido. La totalidad del cuerpo conserva su homogeneidad, al menos aparente, mientras dura toda la serie progresiva de transformaciones. Este fenómeno se denomina *fusión pastosa*. Así ocurre, en particular, con el vidrio y con una serie de substancias capaces de dar en estado sólido materias vítreas.

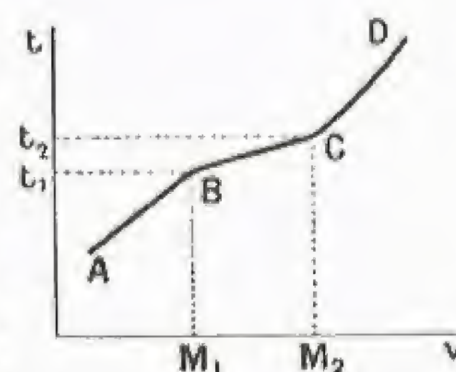


Fig. 129

La curva de la figura 129 representa el aspecto general de variación de la temperatura en función del volumen de estas substancias. La fusión sólo se manifiesta por una inclinación más débil de la curva entre B y C, no estando, por otra parte, ninguno de estos puntos determinado con precisión. Entre los puntos B y C, que corresponden a los volúmenes M_1 y M_2, la substancia adopta en su totalidad un comienzo de fluidez que va aumentando en el sentido M_1M_2, a partir del cual esta fluidez es lo suficientemente grande para que la substancia pueda considerarse como un líquido.

Esta fase comprendida entre M_1 y M_2, que no es sólida ni líquida, sino que tiene algo de cada una de ellas, se denomina algunas veces *fase plástica*; industrialmente es de una gran utilidad, porque es en este estado en el que puede trabajarse el vidrio, ya por soplado, ya por moldeo; por este motivo se buscan, en la preparación de los vidrios, las mezclas que proporcionan un gran intervalo de fusión, es decir, una gran diferencia de temperatura entre el principio y el final de la fusión.

Sobrefusión. — El fenómeno de la solidificación de los cuerpos, que equivale de hecho a un proceso de cristalización, no se produce siempre a una temperatura tan bien determinada como la de la fusión. Existen numerosos cuerpos en los cuales puede observarse que permanecen en estado líquido durante mucho tiempo o siempre a temperaturas con frecuencia muy inferiores a su punto de fusión. Se denominan entonces cuerpos *sobrefundidos*. El agua, el azufre, el fósforo y otros muchos son conocidos por esta particularidad. Uno de los más notables a este respecto es la glicerina, a la que casi sólo se conoce en estado líquido, incluso durante los grandes fríos, y cuyo punto de fusión es próximo a los 20° C sobre cero. Para dicho cuerpo, el estado de sobrefusión es un estado normal. Sólo puede obtenérsele sólido sometiéndolo a una temperatura muy baja, o, mejor aún, iniciando su cristalización mediante la introducción en su masa de un cristal de glicerina sólida. La glicerina sólida puede conservarse fácilmente en un lugar fresco, como una bodega, cuya temperatura no deberá exceder nunca 16° C.

La sobrefusión es, por consiguiente, la propiedad de los cuerpos de mantenerse en estado líquido aunque su temperatura sea inferior a la temperatura de fusión de la substancia sólida. No obstante, los cuerpos pueden adquirir, en este estado, una viscosidad muy grande, y admitiendo que esta viscosidad pueda hacerse considerable, se dice algunas veces de las substancias vítreas que están en sobrefusión porque pasan progresivamente del estado líquido a un estado que sólo puede ser sólido aparentemente; no se observa, en efecto, punto de solidificación caracterizado y no existe cristalización durante la transformación.

Puntos de fusión y presión. — En los hechos antes señalados sobre la fusión y la solidificación se ha admitido que la presión a la que está sometido el cuerpo en la experiencia era la presión atmosférica normal de 76 cm de mercurio. Cuando la presión es diferente, las leyes expresadas siguen siendo válidas para cualquier presión, pero el punto de fusión de cada cuerpo varía en función de la presión.

Si el cuerpo considerado se conduce normalmente, es decir, si se dilata cuando se funde, el efecto del aumento de presión es elevar el punto de fusión. En los pocos casos en que la fusión se produce con disminución de volumen, el aumento de la presión disminuye la temperatura de fusión del cuerpo.

El siguiente cuadro da algunos valores del punto de fusión de diversos cuerpos a presiones diferentes.

PRESIONES	PUNTOS DE FUSIÓN			
	BLANCO DE BALLENA	CERA	ESTEARINA	AZUFRE
1 atm	51° C	64°,5 C	72°,5 C	107°,0 C
519 —	60° C	74°,6 C	73°,6 C	135°,2 C
792 —	80°,2 C	80°,2 C	79°,2 C	140°,5 C

Por estos valores se ve que son necesarias grandes presiones para que el punto de fusión varíe sólo algunos grados. De estos resultados puede deducirse que las variaciones barométricas, cuando se opera, por ejemplo, a la presión atmosférica, no influyen sobre la medida, ya que el aumento o disminución de temperatura que se podría obtener con la mayor variación conocida de la presión atmosférica es inferior a los errores de la experiencia.

En el caso del hielo, que, como es sabido, se contrae durante la fusión, la influencia de la presión tiene como resultado que el punto de fusión descienda por debajo de 0° C.

Las experiencias de William Thompson, hechas con el aparato que representa la figura 130, confirmaron este hecho. Un tubo cilíndrico A, de vidrio espeso, está cerrado en sus extremos por monturas metálicas en las cuales está embutido. La montura superior lleva un émbolo accionado por un tornillo que hace variar la presión en el interior del cilindro. En el interior se coloca hielo, D, y sumergido en él, un ter-

mómetro T sostenido por un anillo de plomo B que mantiene el hielo en el fondo del tubo cilíndrico de vidrio. El resto del tubo está completamente lleno de agua, en cuya parte superior se coloca un manómetro C de aire comprimido.

Por medio de este aparato se determinaron tres valores de fusión del hielo en función de la presión:

a 1	atmósfera	0° C
a 8	atmósferas	— 0°049 C
a 16,8	—	— 0°129 C.

Experiencias, igualmente clásicas, de Mousson y de Tyndall permitieron conseguir presiones de varios millares de atmósferas; en estas condiciones pudo comprobarse que manteniendo todo el aparato a una temperatura de — 20° C se podía obtener la fusión del hielo con una presión suficientemente grande.

El empleo más reciente de las ultrapresiones, que llegan hasta 20 000 atmósferas, ha permitido al americano Bridgman, entre otros, descubrir diversas variedades de hielos nuevos; algunas de ellas, más densas que el agua líquida, tienen, a una presión suficiente, puntos de fusión superiores a 0° C.

Fig. 130

Esta propiedad del agua en estado sólido, incluso a muy baja temperatura, de fundirse bajo una presión suficiente, produce en los glaciares efectos que no podrían comprenderse sin este comportamiento particular del hielo. Así se comprende, por ejemplo, que la nieve muy fría que cae en la superficie se transforme en hielo a partir del momento en que su espesor basta para comprimir las capas inferiores. En ese momento, en efecto, existe formación de agua que se sustrae a la presión penetrando en los espacios vacíos y que se hiela de nuevo al llenar estos espacios; a esta misma causa debe atribuirse lo que se conoce como deslizamiento de los glaciares, tan frecuentemente observado en los países montañosos. En realidad, no existe verdadero deslizamiento, sino fusión del hielo en la parte inferior —a causa de la presión que soporta— y nueva congelación del agua que ha fluido hacia las partes más bajas. Sucede aparentemente como si el glaciar descendiera hacia el valle, pero sin que se vea ninguna señal de un deslizamiento que, en realidad, no se produce.

Los resultados precedentes se muestran por el trazado de las curvas de fusión, que dan, en función de la temperatura de fusión, la presión bajo la cual se efectúa. Estas curvas son en el caso general crecientes, pero cuando se trata del agua, la pendiente es negativa (*figs.* 131 y 132). La curva de fusión divide el plano de las temperaturas y presiones en dos regiones; una, situada a la derecha de la curva, corresponde, para una presión dada, a una temperatura superior al punto de fusión; sus diferentes puntos representan el estado líquido. La región de la izquierda, al contrario, es la relativa al sólido.

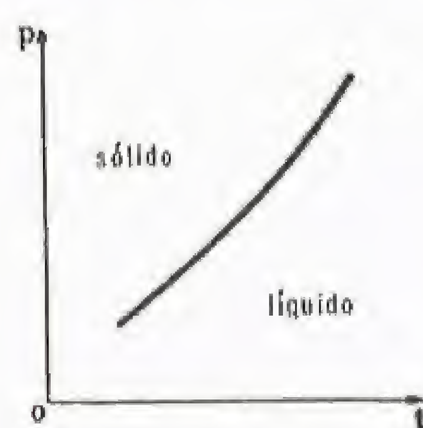


Fig. 131

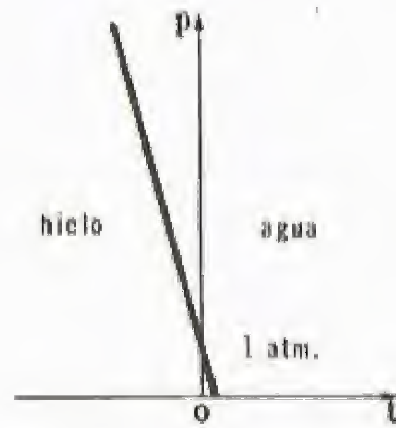


Fig. 132

Medida de las temperaturas de fusión. — La medida de la temperatura de fusión de los cuerpos puede hacerse de muchas maneras, por lo general muy sencillas, y que se pueden concebir fácilmente en cada caso particular, según las condiciones de temperatura necesarias. A título de ejemplo, citaremos, entre los diversos métodos, los más corrientemente empleados para los cuerpos de fusión fácil, como las parafinas, ceras y materias grasas. Se toma un tubo de ensayo, en el que se coloca la materia que hay que ensayar; se sumerge un termómetro en la masa y se coloca el tubo en un baño de maría haciendo que su temperatura aumente lentamente. Sobre la escala del termómetro puede seguirse la variación regular que se produce hasta el momento en que hay una atenuación y después una paralización en la subida del termómetro: es el período de fusión, que dura más o menos tiempo, según la cantidad de materia que se funde y la diferencia de temperatura entre el baño y el interior del tubo de ensayo. Para obtener una buena medida, el fenómeno debe ocurrir con cierta lentitud a fin de que pueda apreciarse claramente el intervalo y la temperatura a que se produce, que es la temperatura de fusión buscada.

En general, se prefiere proceder por solidificación, ya que el termómetro sumergido en el cuerpo inicialmente líquido toma mejor su temperatura que la del sólido. Hay que tener cuidado, para evitar la sobrefusión, de proyectar de vez en cuando en el líquido, que se enfría progresivamente, cristales del cuerpo en estado sólido.

También se efectúan estas medidas con el denominado bloque de Maquenne. Este aparato se compone de un bloque paralelepipédico de cobre A (*fig.* 133) soportado por patas de hierro. En la cara superior del bloque existen pequeños alvéolos en forma de casquetes esféricos *a, a*...,y un agujero cilíndrico longitudinal B, que permite introducir la varilla de un termómetro T a la profundidad aproximada de los alvéolos empleados. Se colocan en estos alvéolos pequeños pedazos del cuerpo cuya temperatura de fusión quiere medirse, siguiendo en el termómetro la temperatura del bloque, que se calienta muy lentamente con un mechero Bunsen colocado debajo. Entonces se lee directamente la temperatura, que corresponde a la fusión observada.

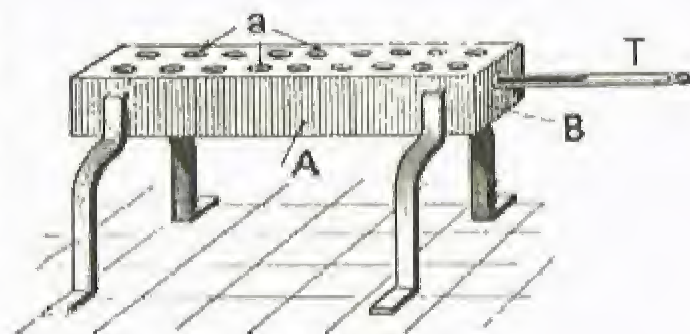


Fig. 133

Calor latente de fusión. — Se denomina así la cantidad de calor que hay que proporcionar a la unidad de masa de la substancia considerada para que pase del estado sólido al estado líquido, a temperatura constante.

Los calores latentes de fusión se determinan por medio del calorímetro durante el período de solidificación. Para ello, se toma una masa determinada m del cuerpo, que se pone a una temperatura T superior a la de fusión θ, y se la vierte en estado líquido dentro del calorímetro, cuya temperatura inicial t asciende a la final t'. Previamente se ha determinado el valor en agua del calorímetro M, así como los valores de los calores específicos del cuerpo en el estado sólido c_1, y en el estado líquido c_2. Entonces podrá escribirse la ecuación siguiente, donde L es el calor latente de solidificación que hay que determinar:

$$mc_2\,(T - \theta) + mL + mc_1\,(\theta - t') = M\,(t' - t),$$

de la cual se deduce L.

Cuando la temperatura θ de fusión del cuerpo es inferior a la temperatura media del calorímetro, es decir, a la del laboratorio, se procede por fusión de la materia, que se solidifica previamente y se sumerge en estado sólido dentro del calorímetro, en donde se funde. El cálculo se efectúa de la misma forma, teniendo en cuenta el signo de los cambios de calor.

El siguiente cuadro indica algunos calores latentes de fusión, expresados en pequeñas calorías por gramo:

CALORES LATENTES DE FUSIÓN

Agua	80	Estaño	15
Fósforo	5	Bismuto	13
Azufre	10	Plomo	5,4
Nitrato de sodio	63	Cinc	28
Cloruro de calcio	41	Plata	21
Fosfato de sodio	67	Mercurio	2,7

Vaporización. — La vaporización, que es el paso de un cuerpo puro del estado líquido al gaseoso, no presenta un carácter tan simple como la fusión. Puede efectuarse sólo por la superficie libre del líquido, de manera irreversible, lo que constituye la *evaporación*, o también por toda la masa del líquido, que se encuentra entonces en equilibrio con el vapor, y que constituye la *ebullición*.

Para determinar las leyes generales de este fenómeno se le estudia primeramente en el vacío. En un barómetro de mercurio A (*fig.* 134), cuya columna tiene una altura H, se introduce por la parte inferior del tubo, por medio de una pipeta curva, una cantidad muy pequeña de un líquido volátil, por ejemplo éter. Tan pronto como la gota alcanza la cámara barométrica, desaparece, observándose en la columna de mercurio un descenso brusco. La adición de varias gotas seguidas en la misma forma provoca el mismo fenómeno, pero llega el momento en que un exceso del líquido introducido deja de vaporizarse cuando llega a la cámara, y forma entonces una capa líquida a en la superficie de mercurio. El espacio aparece en cierta forma "saturado" de vapor, y este vapor se denomina *vapor saturante*.

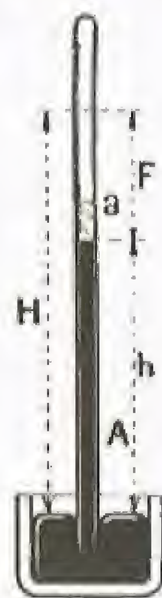


Fig. 134

La diferencia de nivel F = H — h del mercurio representa entonces la presión del vapor que se encuentra en equilibrio con un exceso del líquido a una temperatura determinada. Se llama *presión o tensión máxima* porque es el valor más elevado que puede tener la presión del vapor a la temperatura considerada.

Si levantando o inclinando más o menos el tubo se aumenta el volumen ofrecido al vapor, una parte del líquido en exceso se vaporiza; el vapor permanece saturante mientras exista líquido en contacto con él, y su presión conserva el mismo valor. Si se ha aumentado el volumen lo suficiente para que la *vaporización* sea total, las propiedades del vapor, denominado entonces *vapor seco* o no saturante, se modifican: su presión desciende al aumentar su volumen y se comporta como un gas, siguiendo, sin gran aproximación, las leyes de Boyle-Mariotte y de Gay-Lussac.

Cuando en lugar de operar en el vacío la cámara del barómetro contiene aire u otro gas, así como un exceso de líquido vaporizable, se comprueba que la vaporización no es instantánea, sino lenta. No obstante, la cantidad de líquido que pasa al estado de vapor por unidad de volumen gaseoso es la misma, a cada temperatura, que si el volumen estuviera vacío de aire. El vapor está, por consiguiente, a la presión del vapor saturante, cualquiera que sea la presión de la atmósfera situada encima del líquido. La presión total de la mezcla de gas y vapor es igual a la suma de las presiones de cada uno de los cuerpos (ley de Dalton).

Estos hechos pueden verificarse por un método directo, que consiste en utilizar un frasco A de dos bocas (*fig.* 135). Por una de ellas pasa un tubo vertical abierto en sus dos extremos, que se sumerge en el mercurio situado en el fondo del frasco A y que sirve de manómetro. La segunda boca está atravesada por la parte inferior de un embudo E con una llave de paso R, que contiene cierta cantidad de líquido vaporizable. Una pera de goma P permite, al abrirse la llave de paso R, que el líquido descienda a la superficie del mercurio. Entonces se comprueba que desde que empieza a añadirse el líquido volátil, la presión en el frasco va aumentando hasta el momento en que la totalidad del líquido ya no se vaporiza, sino que se deposita en parte en la superficie del mercurio. A partir de este momento, la presión permanece constante cualquiera que sea la cantidad que se añada, y es la misma que se habrá observado en el vacío para el mismo líquido y a la misma temperatura.

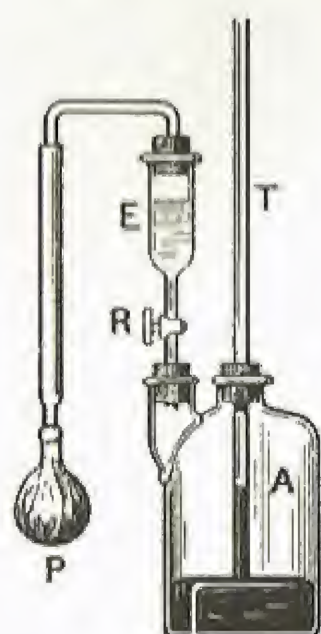


Fig. 135

De estos hechos se deduce que la presión máxima de vapor de un líquido no depende de la presión de la atmósfera que actúa sobre su superficie, ni del volumen que se le ofrece, sino únicamente de su temperatura.

Las experiencias muy precisas de Regnault confirmaron esta conclusión en el caso del agua, ya esté colocada en el vacío, en el aire o en nitrógeno. Las tensiones obtenidas fueron siempre algo menores en los gases que en el vacío, pero este resultado se atribuyó a una causa accesoria; de todas formas, las diferencias obtenidas son prácticamente despreciables.

La velocidad a la que se produce la vaporización del líquido para alcanzar la presión de equilibrio del vapor y del líquido es, en cambio, tanto mayor cuanto menor es la presión del aire. En efecto, en el vacío, todo el vapor producido en la superficie del líquido se dispersa en todo el volumen a causa de su presión, pero a la presión atmosférica el exceso de presión aportado por el vapor es relativamente muy bajo y el vapor saturante persiste cierto tiempo en contacto con el líquido, retrasando su evaporación. Hay, pues, además del tiempo necesario para la propia evaporación, el que toma el vapor formado para difundirse en la masa de aire hasta su concentración uniforme.

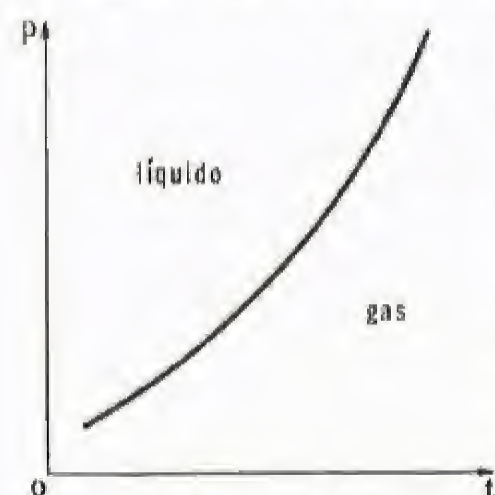


Fig. 136

Midiendo la presión máxima de vapor de un líquido a diferentes temperaturas, se puede trazar un diagrama en el cual el estado de equilibrio de las dos fases, líquido y vapor saturante, se representa por una curva llamada *curva de vaporización*. Esta curva es siempre creciente, ya que la presión máxima aumenta con la temperatura (*fig.* 136). Como veremos más adelante, está limitada, en la parte superior, por el punto crítico, y en la inferior, por el punto triple. Como la curva de fusión, divide el plano en dos regiones: una, situada debajo, relativa al estado gaseoso (vapor seco), y la otra, de la parte superior, relativa al estado líquido.

Se ha intentado representar la presión de vapor saturante en función de la temperatura por una fórmula. Para el agua suele utilizarse la fórmula de Duperray, sencilla, pero poco precisa,

$$F = \left(\frac{t}{100}\right)^4,$$

donde F se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado y t en grados centesimales. En el caso general, la mejor fórmula es la de Dupré,

$$\log F = a - \frac{b}{T} - c \log T,$$

donde T indica la temperatura absoluta.

Puede ocurrir que, en ausencia de polvo, un vapor pueda alcanzar, a una temperatura determinada, una presión superior a su presión máxima sin condensarse. Tal vapor, llamado ***sobresaturante***, se encuentra en falso equilibrio; se condensa bajo forma de niebla en el momento en que se introducen en él pequeñas partículas sólidas o líquidas, sobre todo cuando éstas están electrizadas.

Densidad de los vapores. — La medida de la densidad de los vapores secos reviste en química una gran importancia, ya que de su valor puede deducirse, gracias a la ley de Avogadro, el de la masa molecular del cuerpo considerado.

Para ello se emplea generalmente el método de Meyer. Su principio reside en la determinación sucesiva de la masa m del líquido que se transformará en vapor, y de la masa m' de aire que ocupa el mismo volumen que este vapor, a una misma temperatura y a una misma presión. La densidad es entonces $d = \dfrac{m}{m'}$.

El aparato utilizado se compone de un tubo T, de cuello largo, cerrado por un tapón y provisto de un tubo lateral pequeño que se lleva a una probeta graduada colocada en la cubeta de agua (*fig.* 137). El tubo T se calienta por medio de un manguito en el que se hace hervir un líquido conveniente, y luego se arroja en su interior un frasquito taponado que contiene la masa m del líquido, previamente determinada por peso, poniendo inmediatamente el tapón del tubo T. El líquido del frasco, al alcanzar la temperatura suficiente, se vaporiza rápidamente, y el vapor producido expulsa un volumen de aire igual al suyo, que se recoge en la probeta. Se mide su volumen v y su temperatura t, así como la presión atmosférica H. Se deduce la masa m' de este aire teniendo en cuenta que contiene vapor de agua saturante con una presión F a esta temperatura t. Como la presión parcial del aire es H — F, se tendrá

$$m' = 0{,}001\,293\ v\ \frac{H - F}{76}\ \frac{1}{1 + \alpha t}.$$

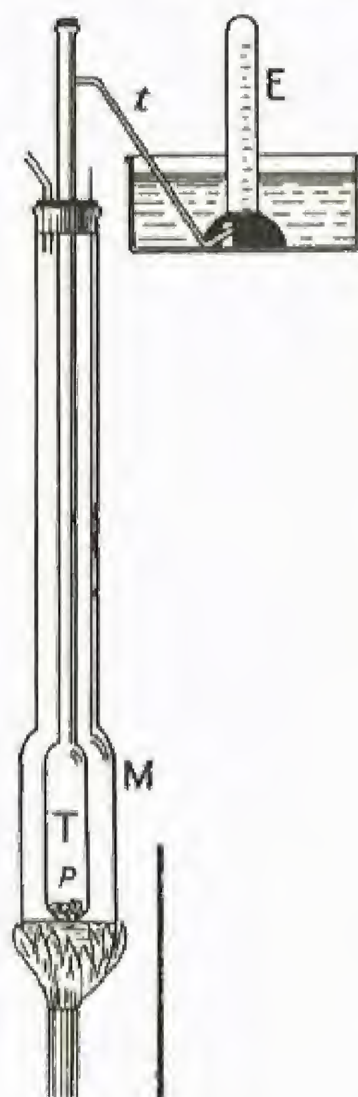


Fig. 137

Ebullición. — La tensión de vapor saturante de los líquidos crece, como acaba de decirse, con la temperatura; así lo muestran los valores, que se indican a continuación, de la tensión de algunos líquidos volátiles a diversas temperaturas.

Por estos valores de la tensión de vapor puede observarse que, para cada cuerpo, existe una temperatura más allá de la cual la tensión del vapor llega a ser superior a la presión atmosférica normal de 760 milímetros de mercurio. Si se calienta a esta temperatura un líquido colocado en un vaso sometido a la presión atmosférica, el líquido emitirá vapores de forma continua; como la presión permanece constante y el vapor del líquido se difunde en un volumen infinito de aire, no cabe posibilidad de alcanzar el equilibrio con la tensión del vapor. La temperatura a la que se produce este efecto se denomina punto de ebullición.

El punto de ebullición bajo una presión dada es característico de los cuerpos puros y forma parte de las constantes específicas más empleadas para caracterizar las diversas substancias, como el punto de fusión, la densidad o la forma cristalográfica.

TEMPERATURA	TENSIONES DE VAPORES EN MM DE MERCURIO				
	ALCOHOL	ÉTER	SULFURO DE CARBONO	CLOROFORMO	AGUA
0° C	12,7	184	128	—	4,6
20° C	44,5	433	298	160	17,4
50° C	220	1 265	857	535	92,0
65° C	437	1 999	1 348	890	187
80° C	813	3 023	2 032	1 408	535
100° C	1 697	4 953	3 325	2 428	760

Ley de la ebullición. — A una presión determinada, cada cuerpo puro entra en ebullición a una temperatura fija que se mantiene constante durante todo el tiempo que dura la ebullición. La temperatura de ebullición es tal, que a dicha temperatura la presión de vapor saturante del líquido es igual a la presión de la atmósfera que rodea el líquido.

El fenómeno de ebullición se manifiesta por la formación de burbujas de vapor que se originan al contacto de la parte directamente calentada del recipiente que contiene el líquido. Estas burbujas de vapor ascienden en el líquido y se condensan poco a poco si las capas superiores del líquido no han alcanzado todavía la temperatura de ebullición. Poco a poco esta temperatura es alcanzada por todo el líquido, y las burbujas de vapor ascienden a la superficie.

El mecanismo de formación de las primeras burbujas exige la presencia en el seno del líquido de vestigios de gas pegados a un punto de las paredes del recipiente —o la presencia de gas disuelto en el líquido—, que se desprenderán al calentarlo. Basta que se forme una primera burbuja para que se inicie la ebullición, de la manera siguiente:

Supongamos que la burbuja de aire saturado de vapor del líquido tenga un volumen v, una temperatura t y una presión H. Como la tensión máxima del vapor del líquido a t^{o} C es F, la tensión propia del aire en la burbuja es (H — F); a la temperatura t', esta presión será (H — F′) y, según las leyes de Mariotte y Gay-Lussac, se tendrá

$$\frac{v(H - F)}{1 + \alpha t} = \frac{v'(H - F')}{1 + \alpha t'},$$

de donde

$$v' = v\ \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t} \cdot \frac{H - F}{H - F'}.$$

Pero si el término (H — F′) de esta expresión es nulo, se tendrá $v' = \infty$. Esto es precisamente lo que ocurre cuando la temperatura t' es igual a la de ebullición del líquido, puesto que a este valor la tensión de vapor del líquido F′ es igual a la presión atmosférica H; en ese momento las burbujas pequeñas aumentan indefinidamente de volumen y se escapan del líquido.

La formación de las primeras burbujas, que hace indispensable la existencia de un gas en el líquido, es la causa de un fenómeno fre-

cuentemente observado cuando se procede a la ebullición de un cuerpo muy puro y en el cual los gases son insolubles, o han sido previamente expulsados. Hay entonces sobrecalentamiento del líquido a una temperatura superior a la del punto de ebullición, y si ésta comienza de una manera fortuita, se produce bruscamente formación de una gran cantidad de vapor que hace peligrar los aparatos. Este fenómeno se denomina ebullición retrasada.

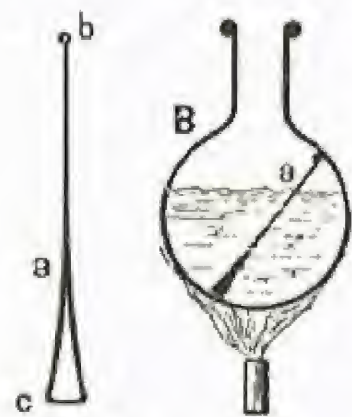


Fig. 138

Este inconveniente se evita empleando un aparato denominado "campana de Gernez", compuesto simplemente de un tubo de vidrio *a* (*fig* 138) estrecho y cerrado por su parte superior *b*, mientras que en su base *c* hay un ensanchamiento que forma una campana que hace de depósito de gas o de vapor. Colocando esta campana dentro del balón B que contiene el líquido que hay que calentar, se observa que la ebullición comienza en el punto en que la varilla *a* está en contacto con el líquido; se evita así la ebullición turbulenta.

Se obtiene un resultado análogo añadiendo al líquido una cantidad pequeña de arena o un cuerpo poroso que lleva aneja la presencia de un poco de aire en el líquido.

Cuando se calienta un líquido en un vaso cerrado y en presencia de una atmósfera gaseosa, la ebullición no es posible a temperatura alguna si ésta es uniforme. En efecto, la presión total de la atmósfera gaseosa, igual a la suma H + F de la presión parcial del gas y de la presión máxima de vapor, no puede ser solamente igual a esta última F, que es la condición necesaria para la ebullición. En este principio se fundan las autoclaves, en las cuales se consigue que el agua líquida alcance temperaturas superiores a 100° C, siempre que las presiones en su interior sean superiores a la presión atmosférica. Estos aparatos sirven especialmente para la esterilización de los objetos contaminados y de las conservas alimenticias.

Medida de las temperaturas de ebullición. — La temperatura de ebullición de los líquidos se determina utilizando un aparato del tipo ya descrito (*fig.* 110) para la determinación del punto de ebullición del agua en la graduación de los termómetros.

El termómetro no debe, en caso alguno, sumergirse directamente en el líquido en ebullición, cuya temperatura puede variar sensiblemente de un punto a otro, sino permanecer en el vapor que se desprende; este espacio debe protegerse del enfriamiento por una doble envoltura calentada por el mismo vapor, a su regreso, antes de escapar al exterior.

Se indican a continuación los valores de las temperaturas de ebullición de algunos cuerpos conocidos a la presión normal de 76 centímetros de mercurio.

PUNTOS DE EBULLICIÓN

Amoniaco	— 3,5° C	Benceno	+ 80° C
Éter	+ 35° C	Agua	100° C
Sulf. de carbono	46° C	Mercurio	357° C
Cloroformo	61° C	Azufre	445° C
Alcohol	78° C	Cinc	918° C

Calor latente de vaporización. — Hemos visto que durante la ebullición de un cuerpo puro la temperatura permanece constante, aunque continúe produciéndose calor. Se denomina *calor latente de vaporización* la cantidad de calor que hay que proporcionar a la unidad de masa de la substancia para que pase del estado líquido al de vapor saturante a una misma temperatura, y por consiguiente a una presión constante.

Para medir esta magnitud por el método de las mezclas, se hace hervir el líquido, y se envía el vapor saturante a un calorímetro de agua. Si se supone que el cuerpo está líquido a la temperatura ordinaria, el vapor saturante se condensa en el calorímetro a su temperatura de ebullición θ, y proporciona de esta manera una primera cantidad de calor mL, si m es su masa y L su calor latente de vaporización a la temperatura θ. Después, convertido en líquido, el cuerpo se enfría desde esta temperatura θ a la temperatura final t' del calorímetro, desprendiendo una nueva cantidad de calor mc $(\theta - t')$, siendo c su calor específico en el estado líquido. Basta expresar que esta cantidad de calor total es igual a la que ha recibido el calorímetro, es decir, con las notaciones corrientes (v. pág. 43): (M + M') $(t' - t)$. Se obtiene, pues, la ecuación

$$mL + mc\,(\theta - t') \;/\; (M + M')\,(t' - t),$$

que permite calcular el calor latente L.

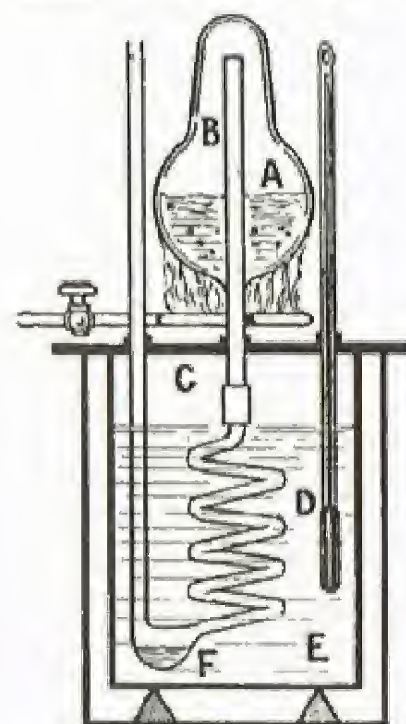


Fig. 139

El aparato empleado más usualmente para esta determinación, a la temperatura normal de ebullición, es el de Berthelot. Se compone de un recipiente de vidrio A (*fig.* 139) cerrado por su parte superior y atravesado con un tubo vertical B. Una vez el líquido dentro del vaso A, entra en ebullición al ser calentado por un mechero de gas C, y el vapor sale por el tubo B a un serpentín D colocado en la parte inferior y sumergido en el agua de un calorímetro E. El líquido condensado es recogido a la salida del serpentín en un ensanchamiento F del tubo. El aparato comunica con la atmósfera por un tubo vertical abierto, para que la ebullición ocurra a la temperatura normal. El serpentín, que puede separarse del resto del aparato, se pesa antes y después de la experiencia, a fin de conocer, hallando la diferencia, la masa del líquido condensado en F. Las lecturas en el termómetro sumergido en el calorímetro permiten calcular la cantidad de calor cedida por el vapor; por consiguiente, se tienen todos los elementos de determinación del calor latente.

En el cuadro que figura a continuación se indican los calores latentes de ebullición normales de algunas substancias.

CALORES LATENTES DE VAPORIZACIÓN BAJO PRESIÓN DE UNA ATMÓSFERA

CUERPOS	L	CUERPOS	L
Agua	540	Cinc	400
Amoniaco	259	Antimonio...	320
Alcohol	208	Plata...	517
Benceno...	92	Cadmio	200
Éter sulfúrico ...	90	Plomo	175
Sulfuro de carbono	84	Mercurio	68
Cloroformo	61	Hidrógeno	114

Los calores de vaporización de este cuadro se refieren a la ebullición a la presión atmosférica normal, es decir, a la temperatura normal de ebullición del cuerpo, pero la ebullición puede hacerse en un vacío más o menos absoluto, o a una presión más o menos fuerte; en estas condiciones se sabe que la temperatura de ebullición será tanto más alta cuanto mayor sea la presión. En cambio, el calor de vaporización disminuye cuando aumentan la temperatura y la presión, anulándose a la temperatura crítica.

Como la ebullición de un líquido se inicia, a una temperatura determinada, cuando la presión llega a ser igual a la tensión de vapor del líquido, existe para cada cuerpo una presión límite por debajo de la cual el líquido puede entrar en ebullición, incluso a baja temperatura. Por ejemplo: el agua, que tiene a la temperatura ordinaria de 15° una presión de vapor de 12,8 mm de mercurio, si se somete su superficie a una presión inferior a este valor, se produce vaporización de agua que tiende a restablecer esta presión. No obstante, si la bomba que produce el vacío continúa funcionando, la presión se fijará a 12,8 mm, y la evaporación se manifestará como una ebullición ordinaria sin que haya necesidad de calentar el agua. Como el calor de la vaporización ya no lo proporciona una fuente exterior, se producirá un enfriamiento del líquido e incluso congelación si se prolonga la operación durante mucho tiempo. Estos hechos pueden utilizarse en la producción de frío, de la cual se hablará más adelante.

Condensación de los vapores. Destilación. — Cuando el vapor saturante de un líquido se mantiene a una temperatura inferior a la que exige la condición de saturación, se produce una condensación de líquido, que continúa hasta que la totalidad del vapor, de nuevo en presencia del líquido producido por su condensación, vuelva a la tensión de vapor que posee el líquido a su nueva temperatura.

Consideremos un sistema cerrado formado por dos esferas de vidrio A y B (*fig.* 140), unidas por su parte superior por un tubo C. La esfera A tiene agua, y el conjunto se sumerge en un baño maría calentado a una temperatura T. Cualquiera que sea el valor de T, el vapor de agua que salga de la esfera A sólo será el necesario para saturar los volúmenes de B y C, y la evaporación del agua en A cesará desde que la presión del vapor haya alcanzado en todo el espacio libre el valor que debe tener en T°.

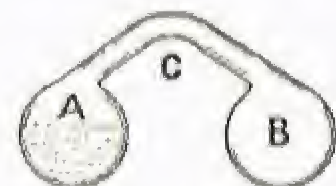


Fig. 140

Si se saca entonces la esfera B del baño maria y se la sumerge en agua fría a la temperatura t, inferior a T, el vapor, que estaba a la presión p_1 correspondiente a T° disminuirá hasta p_2, correspondiente a $t°$; entonces se producirá condensación del agua en la esfera B. Pero como las dos esferas A y B se han conservado a sus temperaturas respectivas T y t, las presiones p_1 y p_2 serán también constantes, se establecerá una corriente de vapor entre A y B bajo la diferencia de presión $p_1 - p_2$, y el agua continuará condensándose en la esfera, hasta que toda la de A haya pasado a B.

Se dice entonces que ha habido destilación de agua de A a B, conociéndose el razonamiento anterior bajo el nombre de "principio de la pared fría" de Watt.

El fenómeno de la destilación se utiliza corrientemente para la purificación de los cuerpos en estado líquido. Entonces se opera de la siguiente forma:

Se coloca el líquido que hay que destilar dentro de un balón de vidrio A (*fig.* 142), de cuello largo, que lleva una rama lateral B y cuya parte superior está cerrada por un tapón, a través del cual se hace pasar un termómetro T. La rama lateral B atraviesa la abertura superior de un aparato denominado "refrigerante", que se compone de un tubo interior C rodeado de una doble protección D, por la que asciende constantemente una corriente de agua fría. El balón A, montado sobre un soporte E y calentado por un mechero de gas F, aumenta progresivamente de temperatura, lo mismo que el líquido que contiene, y cuando dicha temperatura es bastante elevada, se produce ebullición del líquido; el vapor sale por el tubo B y se condensa en el tubo C enfriado del refrigerante. El producto condensado se recoge en V.

En la figura 141 se reproduce la forma más sencilla de refrigerante. Existen muchos modelos diferentes. En los aparatos industriales de destilación, o *alambiques*, el refrigerante lo forma un tubo en forma de serpentín S (*fig.* 142), arrollado en espiral y sumergido en el interior de

una cuba cilíndrica R de metal en la que se produce una corriente de agua que penetra por el estrechamiento inferior V y sale por U. Los vapores, al contrario, penetran por la parte superior del serpentín T, y el líquido condensado se vierte por el estrechamiento inferior A.

La figura 143 representa un tipo de refrigerante de laboratorio muy corriente. Es todo de vidrio, y su particularidad consiste en que el tubo central, atravesado por los vapores que se van a condensar, consta de una serie de ensanchamientos sucesivos A, B, C más o menos numerosos. La finalidad de esta disposición es aumentar la superficie de

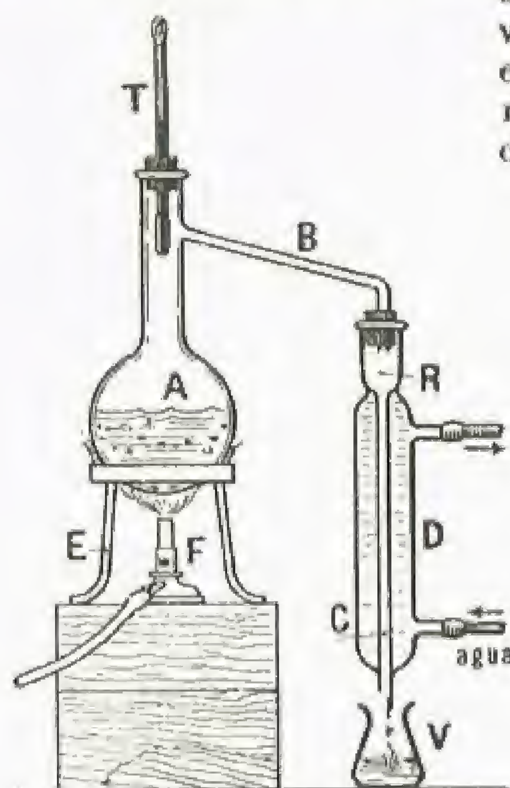


Fig. 141

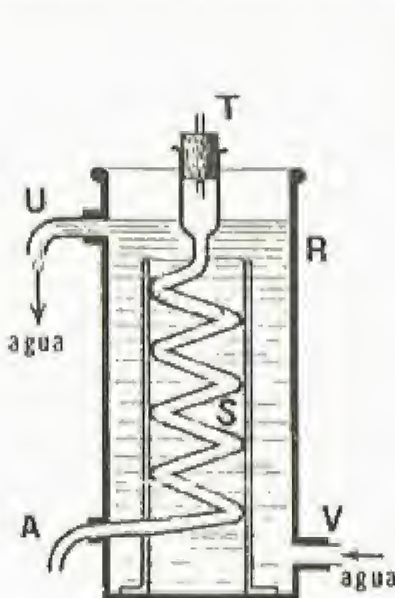


Fig. 142

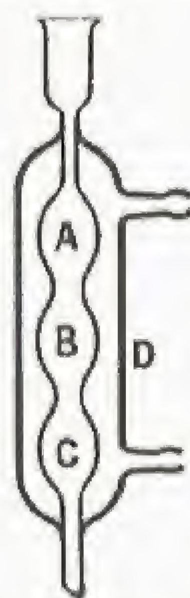


Fig. 143

las paredes enfriadas por la circulación del agua y que los vapores se mezclen al pasar por los estrangulamientos situados entre las bolas A, B, etc.

Cuando la destilación tiene simplemente como objeto separar las materias sólidas que contiene un líquido, ya en suspensión, ya en disolución, bastan los aparatos tan sencillos que acaban de describirse.

No ocurre lo mismo cuando se trata de separar los diferentes cuerpos contenidos en un líquido mezclado, sobre todo si estos cuerpos son igualmente volátiles a la temperatura de ebullición del disolvente.

Destilación fraccionada. — En general, cuando dos líquidos son miscibles, como el agua y el alcohol, cuyos puntos de ebullición son 100° C y 78° C, respectivamente, a todas las temperaturas se forman vapores que son una mezcla de los dos cuerpos considerados. Las proporciones de cada uno de ellos en la mezcla dependen de la temperatura a que hierve la mezcla. Cualquiera que sea la temperatura de ebullición en un momento dado de la destilación, para tener alcohol concentrado a la salida del refrigerante es indispensable que los vapores que en él penetren se aproximen lo más posible a 78°, temperatura de condensación del vapor de alcohol.

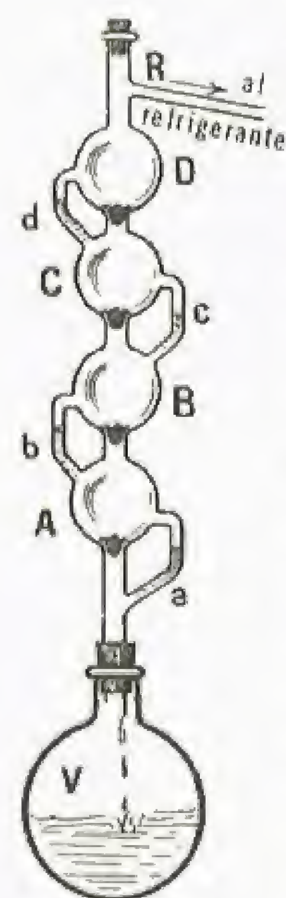


Fig. 144

El aparato se dispone entonces de forma que se enfríen progresivamente los vapores antes de que penetren en el refrigerante haciendo que atraviesen lo que se denomina una *columna* de destilación. Estas columnas son de formas bastante diversas, pudiendo estar constituidas por una serie de ampollas A, B, C, ... (*fig.* 144), superpuestas en mayor o menor número, que se comunican entre sí por un tubo central a través del cual pasan los vapores que emite al calentarse la mezcla líquida del balón V. Cada una de las ampollas contiene una espiral pequeña de un alambre inalterable que obtura parcialmente la abertura del tubo central de llegada de vapores, de forma que éstos impiden, al subir, que el líquido que se condensa en las ampollas vuelva a descender por el mismo camino. Las ampollas están unidas lateralmente entre sí por tubos capilares *a*, *b*, *c*, ..., que permiten que el líquido que se condensa en ellas circule a las ampollas inferiores, pero están colocadas de tal forma que en cada una de ellas queda cierta altura de líquido que obliga a los vapores a atravesarlos por burbujeo. En este dispositivo, la temperatura de ebullición de las mezclas líquidas contenidas en las ampollas es tanto más baja cuanto más cerca se está de la cúspide de la columna. Los vapores se enriquecen en los productos más volátiles conforme atraviesan las diversas ampollas. De esta forma se consigue, en una sola destilación, un producto tan bien rectificado como el que podría obtenerse por una serie de destilaciones sucesivas.

Ebullición de una mezcla de dos líquidos. Aceotropía. — Por bien que se haga la destilación fraccionada de una mezcla diluida de agua y alcohol, no se consigue obtener alcohol puro o absoluto; para explicar el porqué es necesario exponer la teoría del fenómeno.

Consideremos una mezcla homogénea de dos líquidos A y B, e indiquemos sobre la abscisa de un diagrama el porcentaje en masa de B. Dos ejes verticales representan: el primero, A*t*, el cuerpo A puro, y el segundo, B*t*, el cuerpo B puro. Un punto intermedio M representa una mezcla de composición determinada. Para cada valor de esta composición, puede medirse la temperatura a la que comienza su ebullición, que se indica sobre la ordenada del diagrama. Se obtiene así una curva *amb*, que indica la temperatura de ebullición inicial en función de la proporción. Los puntos *a* y *b* corresponden en particular a las temperaturas de ebullición de los dos cuerpos puros. Análogamente, puede determinarse, partiendo de una mezcla de cuerpos A y B en estado gaseoso, la temperatura de licuefacción inicial o punto de rocío, y representarla por la curva *anb* situada encima de la anterior, pero con los mismos extremos, ya que la ebullición y la licuefacción de un cuerpo puro se producen a la misma temperatura.

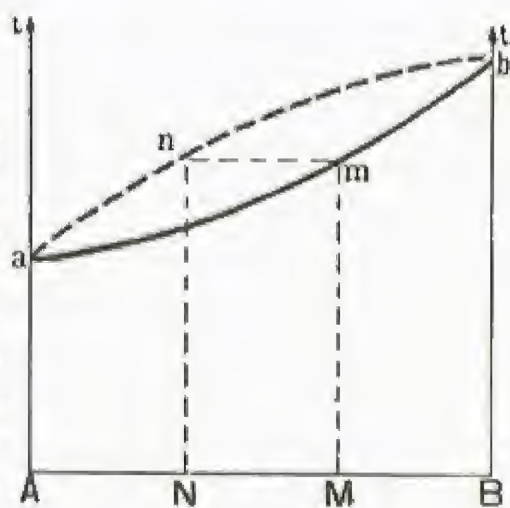


Fig. 145

La experiencia muestra que estas curvas pueden presentar tres formas. En el caso más sencillo carecen de máximo y mínimo (*fig.* 145). Si se calienta una mezcla líquida cuya composición está representada por el punto *m*, el vapor que se produce a una misma temperatura tiene por composición la que corresponde al punto *n*, de igual ordenada; por consiguiente, será más rica en cuerpo A (el más volátil) que el líquido. Si después se condensan en un refrigerante descendente los vapores, a medida que se van formando, el líquido se empobrece en A, y los puntos *m* y *n* se desplazan en las curvas hacia la derecha, hasta el punto *b*, donde se unen. La temperatura de ebullición crece progresivamente y se acaba por obtener un líquido formado por el cuerpo B puro, que es el menos volátil de ambos. Puede razonarse a la inversa considerando la mezcla de los vapores de A y B. Si se representa inicialmente por el punto N, comienza a condensarse a la temperatura del punto *n*. El líquido que se forma, que corresponde a *m*, es más rico en B que el vapor. Al proseguirse el enfriamiento, los dos cuerpos tienden al mismo tiempo hacia *a*, y el vapor sólo contiene el cuerpo A, el más volátil de los dos. En la destilación fraccionada, en la que se realizan simultáneamente las dos transformaciones, se aislará uno del otro: A en estado gaseoso y B en estado líquido.

Puede también ocurrir que las dos curvas presenten ya un máximo P (agua y ácido clorhídrico, por ejemplo), ya un mínimo Q (agua y alcohol etílico) comunes (*fig.* 146 y 147). En ambos casos la destilación fraccionada permitirá separar uno de los dos constituyentes A o B en estado puro. Se obtendrá, además, una mezcla de composición fija, que destila a una temperatura invariable. El resultado será

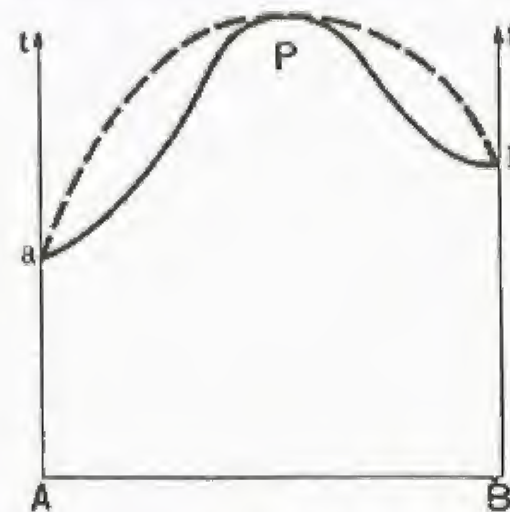


Fig. 146

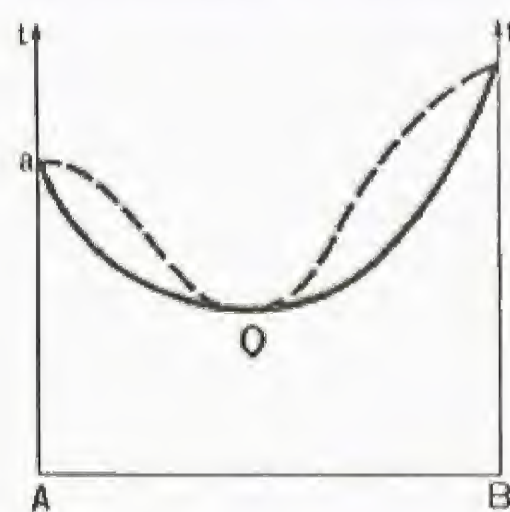


Fig. 147

una mezcla de punto de ebullición máximo, obtenido en estado líquido, o una mezcla de punto de ebullición mínimo, separado en estado gaseoso. Tal mezcla, que sigue las leyes de ebullición de los cuerpos puros, se llama *mezcla aceotrópica*. Su composición varía cuando se modifica la presión a la cual se realiza la ebullición, lo que pone de manifiesto que se trata de una mezcla y no de una especie química.

Sublimación. — La tensión máxima de vapor de los líquidos, que no es nula a la temperatura de congelación, conserva un valor medible incluso para los cuerpos en estado sólido. El hielo, por ejemplo, tiene una tensión de vapor a 0° C de 4,6 mm de mercurio; a — 20° C, esta tensión es sólo de 0,8 mm; es evidente que si en el dispositivo que se emplea para la evaporación de los líquidos de la figura 141 se pone la parte A que contiene agua a la temperatura de — 1° C, a la cual su presión es 4,2 mm de mercurio, y la parte B a — 20° C, habrá un flujo de vapor en el tubo C, que irá de A hacia B; la presión en B se hará superior a 0,8 mm y se condensará vapor que tomará inmediatamente el estado sólido, porque la temperatura es muy inferior a la de solidificación del agua. Habrá entonces destilación del hielo desde el punto menos frío al punto más frío. Este paso directo del estado sólido al gaseoso se denomina *sublimación*.

Este fenómeno lo experimentan normalmente, a la presión atmosférica, el fósforo rojo, el anhídrido arsenioso y el anhídrido carbónico. Inversamente, enfriando estos cuerpos tomados en estado gaseoso, se les transforma directamente en estado sólido. Durante esta transformación existe equilibrio entre las dos fases y, a una presión dada, la temperatura de sublimación es fija para un cuerpo puro.

Esta temperatura de sublimación depende de la presión y puede representarse el fenómeno por una curva de coordenadas *t* y *p*, que da una de las magnitudes en función de la otra. Esta *curva de sublimación* representa también las variaciones de la presión de vapor saturante de un sólido en función de la temperatura.

La sublimación es también posible mediante una transformación irreversible análoga a la evaporación. Así, puede observarse cómo la nieve desaparece progresivamente del suelo, sin fundirse, a una temperatura inferior a 0° C.

El yodo, en particular, tiene su punto de fusión a 113° C y el de ebullición a 184° C. Pero, a la temperatura ordinaria, su tensión de vapor es suficiente para que el yodo contenido en un matraz cerrado coloree el aire con el color violeta de su vapor. Además, si el matraz es bastante grande para que todos los puntos de su superficie no estén a la misma temperatura, se formarán cristales de yodo en las partes más frías. El mismo fenómeno se observará en los frascos de laboratorio que contienen dicho metaloide.

Todos los cuerpos sólidos cuya presión de vapor a la temperatura ordinaria es bastante grande, y que varía muy rápidamente en función de la temperatura, son susceptibles de sublimarse, con los mismos efectos que el yodo.

Punto triple. — Hemos visto que a cada uno de los cambios de estado físico corresponde, en función de las temperaturas y las presiones, una curva que representa el equilibrio de un cuerpo puro con dos fases coexistentes. La curva de vaporización V y la curva de fusión F se encuentran en un punto T, en el que coexisten los tres estados físicos. Este punto, por el que también pasa la curva de sublimación S, se denomina punto triple. Por consiguiente, en un cuerpo puro no pueden coexistir los tres estados sólido, líquido y gaseoso más que a una presión y temperatura determinadas.

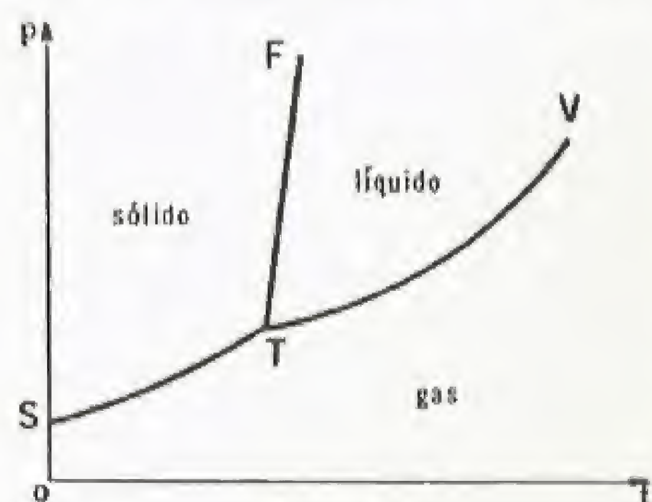


Fig. 148

Estas curvas dividen el diagrama en tres regiones, cada una de las cuales corresponde a un solo estado físico. Su naturaleza se precisa en la figura 148. Se ve, en particular, que la región que corresponde al estado líquido está completamente por encima del punto triple, de donde se deduce que dicho estado sólo puede obtenerse a una presión superior a la de este punto.

Podemos comprender ahora qué fenómenos se producen cuando se calienta un sólido a una presión constante, transformación que se representa en el diagrama por una recta horizontal. Si la presión es superior a la del punto triple, el cuerpo pasa primeramente al estado líquido por fusión, a la temperatura determinada por la intersección de la curva F. Después, el líquido entra en ebullición a una temperatura superior, cuando el punto que la representa atraviesa la curva V. Así sucede con el agua a la presión atmosférica, puesto que la presión de su punto triple sólo vale 4,6 mm de mercurio. El punto triple del anhídrido carbónico corresponde, en cambio, a una presión aproximada de cinco atmósferas. Si se deja nieve carbónica a la presión atmosférica, se sublimará sin fundirse a la temperatura de — 79° C. Por ello se emplea este cuerpo, a el nombre de hielo seco, para la producción de frío; el mismo cuerpo puede liquidarse a una presión suficiente. Se le encuentra en el comercio en estado líquido, comprimido en botellas de acero.

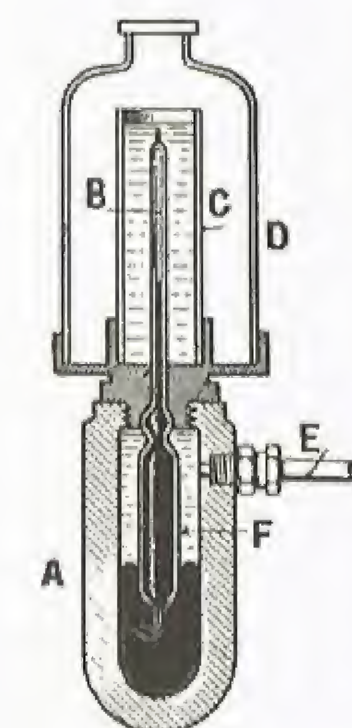


Fig. 149

La determinación de las curvas de equilibrio, y principalmente de la más importante desde el punto de vista de las aplicaciones, aquélla en que el líquido se encuentra en presencia de su vapor, puede hacerse por medio del aparato de Cailletet. Este aparato se compone de un bloque de acero hueco A, que contiene mercurio hasta cierta altura (*fig.* 149). Sumergido en el mercurio por la parte inferior, el tubo B contiene el gas que hay que liquidar, por ejemplo, anhídrido carbónico. La parte alta del tubo B sale al exterior, en donde está rodeada de agua o de otro líquido y mantenida a una temperatura más o menos elevada. Finalmente, una tercera envoltura D cubre todo el conjunto, para proteger contra las explosiones en caso de ruptura del tubo.

Enviando por el tubo lateral E agua a presión a la superficie del mercurio contenido en el bloque de acero A, se obliga al mercurio a ascender por el tubo B lo que comprime el gas situado dentro.

Cuando el mercurio llega a la parte inferior del exterior del tubo B (*fig.* 150), no se ha formado todavía líquido en la superficie del mercurio, pero si se continúa aumentando la presión, se forman las primeras gotas del líquido; se anotan la presión y la temperatura que corresponden al comienzo de la licuefacción.

a b c

Fig. 150

Se continúa comprimiendo, y entonces el volumen ocupado en la superficie del mercurio disminuye, la cantidad liquidada aumenta, pero si la temperatura ha permanecido constante, la presión conserva su valor hasta el momento (*c*) en que se ha liquidado todo el gas; desde ese momento, las disminuciones de volumen del líquido sólo se obtienen con presiones rápidamente crecientes.

Puede obtenerse de esta forma el valor de la presión de licuefacción del gas para toda una serie de temperaturas y construir la curva de vaporización V. Disminuyendo suficientemente la temperatura por medio de líquidos enfriados intensamente y aumentando suficientemente la presión, se pasará por la solidificación del líquido, cuya curva es más difícil de construir por ser pequeña la variación de la temperatura que hay que medir, al menos con este dispositivo experimental. Con temperaturas aún inferiores y por debajo de las del punto triple, podrá reducirse la presión sin volver a encontrar el estado líquido, sino únicamente los estados sólido y gaseoso.

El aparato de Cailletet sólo permite operar, evidentemente, a temperaturas más elevadas que la del punto de solidificación del mercurio (— 39° C) e inferiores a la de su punto de ebullición (+ 357° C).

Punto crítico. — El aparato de Cailletet permite también trazar las denominadas *curvas isotermas;* para ello, se inscribe, a cada temperatura constante, el valor de la presión que se lee en el manómetro en función del volumen observado que corresponde al gas, que puede además liquidarse parcialmente. Como el tubo de vidrio del aparato de Cailletet es cilíndrico, basta con medir la altura del mercurio a cada presión para deducir el volumen.

Se indica en abscisas el volumen que corresponde a un gramo de fluidez, es decir, el volumen específico.

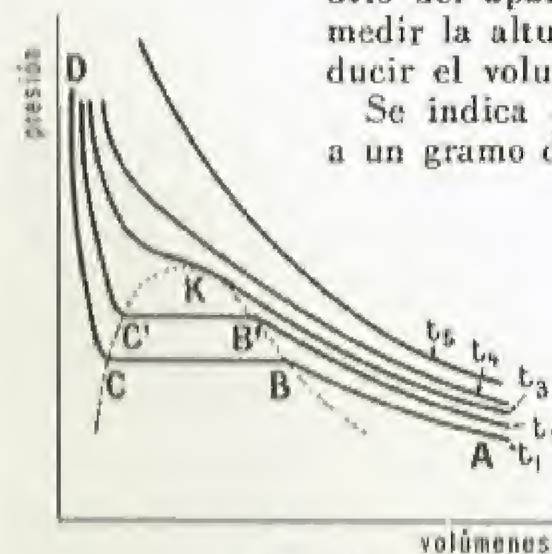


Fig. 151

A una temperatura bastante baja, cada curva isoterma adopta la forma ABCD (*fig.* 151), en las que se distinguen tres partes:

1° La parte AB, que corresponde a las variaciones relativamente pequeñas de la presión por variaciones relativamente grandes del volumen, como existen en el estado gaseoso;

2° La parte BC, que es una recta horizontal, durante cuyo recorrido el volumen varía sin que varíe la presión; es el período de licuefacción;

3° La parte CD, en la que hay compresión del líquido que ocupa todo el volumen, y que da una curva rápidamente ascendente.

Las isotermas construidas a temperaturas más elevadas se distinguen de la primera por partes horizontales BC más cortas. También ocurre, a cierta temperatura, que esta parte horizontal ya no se presenta y deja de comprobarse el fenómeno de licuefacción. El punto K, que corresponde el máximo de la curva de los lugares geométricos de los puntos BB′ ... y CC′ ..., es el denominado *punto crítico* del cuerpo.

A temperaturas superiores a la de la isoterma que pasa por el punto crítico, las curvas de las tempearturas próximas experimentan una deformación pequeña, que se va atenuando a temperaturas más elevadas, hasta que la curva isoterma se aproxima a una hipérbola, como lo exige la ley de Mariotte para los gases perfectos.

La curva de la figura 136 no continúa, por lo tanto, indefinidamente, sino que queda limitada, en un punto K, a cierto valor definido por una temperatura y una presión denominadas *temperatura* y *presión críticas.* En el cuadro siguiente se indican las constantes críticas de algunos cuerpos puros:

CUERPOS	TEMPERATURA CRÍTICA	PRESIÓN CRÍTICA EN ATMÓSFERAS
Helio	— 268°	2,25
Hidrógeno	— 240°	12,8
Neón	— 228°	27
Nitrógeno	— 147°	34
Óxido de carbono	— 139°	35
Oxígeno	— 119°	50
Anhídrido carbónico	+ 31°	73
Gas clorhídrico	52°	83
Anhídrido sulfuroso	157°	78
Éter	194°	36
Ácido acético	321°	54

A la temperatura y presión críticas hay que añadir el *volumen específico crítico,* proporcionado también por las curvas de Andrews, o la *masa específica crítica,* que es su inversa.

Continuidad de los estados líquido y gaseoso. — Tomemos, como ejemplo, el caso del anhídrido carbónico, que es uno de los cuerpos que mejor se prestan para la experiencia. Consideremos la isoterma a 13° C (*fig.* 152), que presenta un rellano BC durante la liquidación, y la de 48°, que pasa por encima del punto crítico K y, por consecuencia, es una curva continua: si, de acuerdo con la experiencia, nos colocamos a la temperatura de 13° y aumentamos la presión del gas, recorreremos la rama de isoterma de A a B, y si continuamos reduciendo el volumen, observaremos una liquidación del gas cada vez mayor hasta el punto C, en que se habrá completado. Desde C a D, sólo habrá una variación pequeña de volumen al aumentar la presión, porque los líquidos son poco compresibles.

p 13° 48° D E K F 48° C B 13° A v

Fig. 152

Se parte entonces de una fase gaseosa única, observándose simultáneamente la existencia de una fase líquida y de una fase gaseosa hasta C; después de este punto sólo queda la fase líquida. Se ha asistido, pues, a la discontinuidad del cambio de estado, que puede observarse en sentido inverso si se aumenta el volumen conservando la misma temperatura de 13° C.

No obstante, si cuando se ha llegado al punto D se eleva la temperatura hasta 48° C manteniendo la presión constante, se recorrerá la

recta DE; después, aumentando el volumen a 48° C, se seguirá la rama de isoterma EF, y por último, reduciendo la temperatura desde 48° a su valor inicial de 13° C, a volumen constante, volveremos a encontrar el punto A de origen del ciclo.

En la segunda parte de este ciclo se ha partido del punto D, en que el anhídrido carbónico era líquido —ya que se ha asistido a su liquidación entre los puntos B y C—, y se ha llegado al punto A —en el cual este cuerpo es, evidentemente, gaseoso— sin que se haya observado indicio alguno de vaporización. La masa carbónica fluida ha variado de volumen, de temperatura y de presión, pero ha conservado constantemente su homogeneidad, y no ha habido, al parecer, vaporización.

Esto obedece a que el paso de líquido a gas ha sido gradual en toda la masa del anhídrido carbónico y que, gas o líquido, el cuerpo sólo ha cambiado de volumen, de densidad, de índice de refracción, de viscosidad, etc., pero siempre de una manera continua. Esto es lo que se denomina continuidad de los estados líquido y gaseoso.

La existencia simultánea de estas dos fases en contacto mutuo sólo tiene lugar en las condiciones de temperatura, presión y volumen del interior de la curva CKB, en la cual puede producirse una discontinuidad. Para los restantes puntos escogidos en el exterior de esta curva, no puede precisarse si el estado del cuerpo es líquido o gaseoso, porque ambos estados no se diferencian entre sí más que por sus propiedades físicas relativas, como la densidad, que hace que se separen en dos capas distintas cuando coexisten en un espacio cerrado.

Estados correspondientes. — Los haces de isotermas que constituyen las curvas de Andrews se han construido basándose en los datos experimentales de un gran número de cuerpos fluidos. Tienen la misma forma para todos los cuerpos, y sólo difieren entre sí por la posición del punto crítico y por la escala de abscisas y ordenadas de las curvas.

Los sistemas de curvas, cada uno de ellos propio de un cuerpo puro determinado, pueden aproximarse considerando como comunes sus puntos críticos. En efecto, los valores críticos dados anteriormente muestran que cada cuerpo está caracterizado por valores de la presión crítica p_c y de la temperatura crítica t_c. Si, para un cuerpo cualquiera, el valor de la temperatura permanece superior a t_c, el cuerpo se conservará en estado gaseoso, cualesquiera que sean las transformaciones que se haga sufrir a su volumen o a su presión. Por consiguiente, una primera aproximación entre los sistemas de curvas de los diversos cuerpos se conseguirá escogiendo la temperatura crítica como unidad y expresando todas las temperaturas absolutas T por el cociente $\frac{T}{T_c}$, en donde T_c se considera como unidad de temperatura, que difiere de un cuerpo a otro.

Si se hace lo mismo para las presiones y los volúmenes específicos, se tendrá

$$\theta = \frac{T}{T_c}, \qquad \pi = \frac{p}{p_c}, \qquad y \qquad \varphi = \frac{v}{v_c}.$$

Ahora bien, los haces de isotermas construidos con estas nuevas unidades son tales que todos los cuerpos se conducen de la misma manera en sus cambios de volumen, bajo la influencia de la temperatura y de la presión, cuando se les considera a temperaturas θ y a presiones π expresadas de esta forma. Los estados sucesivos que estos cuerpos pueden tomar se corresponden cuando los valores de las presiones, de las temperaturas y de los volúmenes se expresan tomando por unidad, en cada caso, el valor crítico propio de cada cuerpo. Todos los fluidos tienen entonces un haz común de isotermas.

Por ejemplo, el anhídrido carbónico tiene una temperatura crítica $T_c = 273 + 31 = 304°$ C, y el anhídrido sulfuroso $T'_c = 273 + 157 = 430°$ C. Si se considera la temperatura T_1 para el anhídrido carbónico, se encontrará la temperatura correspondiente del anhídrido sulfuroso, T_2, por la relación

$$\frac{T_1}{T_c} = \frac{T_2}{T'_c}.$$

Haciendo $T_1 = 273 + 10 = 283°$ C, se tendrá

$$T_2 = T_1 \frac{T'_c}{T_c} = 283 \times \frac{430}{304} = 400° \text{ C}.$$

Por consiguiente, las temperaturas de 10° C y de 400 — 273 = 127° C son, respectivamente, temperaturas correspondientes para el anhídrido carbónico y el anhídrido sulfuroso, y conociendo el estado del primero a la temperatura de 10° C puede concluirse que el del segundo es el mismo a 127° C; su presión podrá, pues, calcularse por comparación con el anhídrido carbónico para un volumen correspondiente de anhídrido sulfuroso. Téngase en cuenta que la ley de los estados correspondientes es sólo aproximada.

Licuefacción de los gases

Reseña histórica. — A principios del siglo XIX, **Faraday** (1791-1867) consiguió liquidar la mayoría de los gases, proporcionando así la prueba de la identidad entre gases y vapores. No obstante, ciertos gases no pudieron liquidarse ni siquiera mediante el empleo de presiones muy elevadas: por ejemplo, el hidrógeno, el nitrógeno, el oxígeno, el óxido de carbono, el metano y el óxido de nitrógeno. **Andrews** (1813-1886) explicó la causa de este fracaso en 1867, al descubrir la temperatura crítica.

Para liquidar los gases llamados permanentes es necesario, pues, obrar simultáneamente sobre la temperatura y la presión. **Cailletet** consiguió liquidar algunos de ellos (1877) por una expansión brusca de un gas comprimido. **Pictet** (1842-1929) llegó al mismo resultado por el método de cascadas.

En 1883, Wroblewski y Olszewski transformaron todos los gases permanentes en gruesas gotas, salvo el hidrógeno, que fue liquidado por **Dewar** (1842-1923) en 1897. El helio, descubierto en 1894, fue liquidado a su vez en 1908 por **Kamerlingh Onnes** (1853-1926).

El problema industrial de la liquidación del aire ha sido resuelto con arreglo a los principios obtenidos por **Werner Siemens** (1816-1892) en 1857, por **Hampson** (1857) en Inglaterra, **Linde** en Alemania (1895) y el francés **Georges Claude** (nacido en 1870).

Licuefacción de los gases. — Para liquidar un gas es necesario someterlo a una presión y temperatura tales que la tensión máxima a esta temperatura sea igual a dicha presión (ley de la ebullición). Puede operarse por compresión, por enfriamiento o por una combinación de ambos métodos.

Como ya se ha visto, la única forma de liquidar un gas mediante compresión consiste en mantenerlo a una temperatura inferior a su temperatura crítica. En cuanto al anhídrido carbónico y todos los demás gases cuya temperatura crítica es más elevada que la temperatura ordinaria, podrán liquidarse por simple compresión.

La presión a que hay que someterlos para que pasen al estado líquido es tanto menor cuanto menor es la temperatura.

La reducción de volumen que se produce para obtener el estado líquido permite acumular grandes cantidades de gas en volúmenes restringidos y con una presión, por lo general, poco elevada. A continuación se indican, a título de ejemplo, las presiones de diversos cuerpos, a la temperatura de 15°, que pueden conservarse líquidos en botellas de acero y que así se utilizan en la práctica:

PRESIÓN EN ATMÓSFERAS A 15°

Anhídrido sulfuroso	2,7
Cloruro de metilo	4,1
Amoníaco	7,1
Sulfuro de hidrógeno	16,4
Anhídrido carbónico	52,2

Para estos diversos cuerpos, que son gaseosos a la presión atmosférica y a la temperatura ordinaria, la licuefacción se obtiene fácilmente por compresión y enfriamiento mediante un dispositivo que se reduce esquemáticamente a un compresor P (*fig.* 153) accionado por un motor. El gas que hay que liquidar se aspira en A a la presión ordinaria y se expulsa, a una presión suficiente, a B. Como durante la compresión se ha producido calentamiento del gas, éste debe pasar a un condensador R, constituido por un cuerpo metálico que contiene una serie de tubos que atraviesan los gases calientes a la vez que se mantienen constantemente a baja temperatura por una corriente de agua que entra por F y sale por G. A la presión proporcionada por el compresor y a la temperatura del condensador, el gas se liquida y fluye a la parte inferior D, de donde puede extraérsele por medio de la llave de paso E para llenar las botellas.

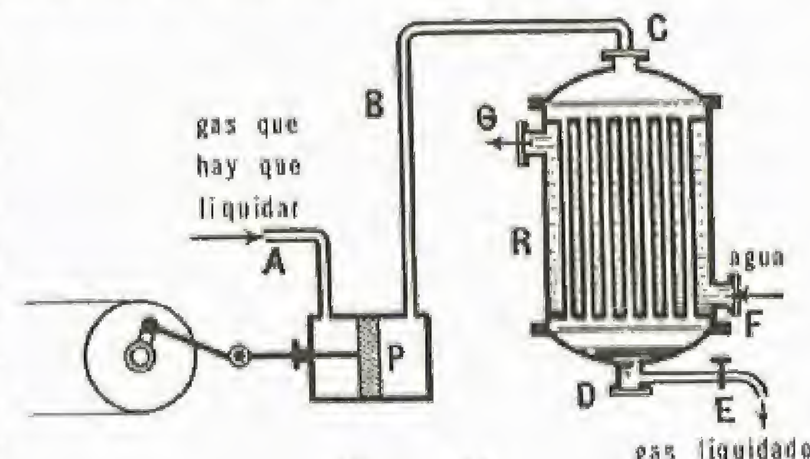


Fig. 153

Con gases como el aire, el oxígeno, el nitrógeno, el hidrógeno, etc., cuya temperatura crítica es muy baja, no es posible aplicar el mismo método para liquidarlos, dada la imposibilidad práctica de conseguir una temperatura tan baja como sería necesaria en el refrigerante; en este caso se utiliza la propiedad que tienen los gases de enfriarse al dilatarse.

Aunque la expansión de un gas perfecto, cuando se verifica sin que haya producción de trabajo, no lleva consigo enfriamiento alguno, los gases sometidos a una fuerte presión se desvían por lo general bastante del estado perfecto y se enfrían cuando la presión disminuye bruscamente. No obstante, si la expansión ocurre sin adoptar precauciones especiales, el enfriamiento es insuficiente para que el gas alcance una temperatura próxima a su punto de liquidación, tratándose de cuerpos como el nitrógeno o el oxígeno.

Aire líquido por la máquina de Linde. — Linde pudo obtener, por un dispositivo particular, una producción regular de aire líquido por expansión de aire comprimido a 200 atmósferas.

La máquina de Linde se compone, en principio, de un serpentín A, formado por dos tubos concéntricos S y S' (*fig.* 154) de gran longitud, aislados en su parte exterior por una capa espesa de algodón. El aire comprimido penetra por el tubo interior de diámetro pequeño S, donde se expande hasta la botella B colocada en la parte inferior. Al llegar a esta botella, el gas ha sufrido ya un enfriamiento y sale por

el tubo exterior de diámetro mayor, S', enfriando el tubo interior S de llegada del aire. Al salir de S, el aire vuelve a pasar por el compresor, que lo somete de nuevo a su presión inicial de 200 atmósferas y lo envía al serpentín interior S.

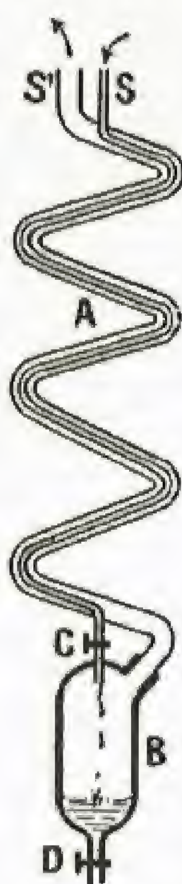


Fig. 154

El conjunto de tubos S y S' se denomina *cambiador de temperaturas*, ya que el gas que sale del tubo S alcanza la temperatura del que entre en S' y viceversa.

En una expansión progresiva, como la que ocurre en el serpentín S, el aire se enfría aproximadamente un cuarto de grado por atmósfera, es decir, que si el compresor lo somete a una presión de 200 atmósferas, su temperatura disminuye 45° C, aproximadamente, mientras atraviesa el serpentín S; pero el propio serpentín es enfriado por el aire que regresa del serpentín S', y la temperatura va disminuyendo constantemente desde que se pone en marcha el compresor hasta que la temperatura desciende al valor que corresponde a la licuefacción. Producida ésta, se verifica un paso de aire líquido que sale del serpentín S y cae en la botella B, de donde puede retirarse periódicamente abriendo la llave de paso D.

Aplicaciones de los gases liquidados. — Los gases liquidados se utilizan en la práctica ya para producir, sin necesidad de mucho espacio, determinados gases, como el anhídrido carbónico, el anhídrido sulfuroso, el amoniaco, etc., que se emplean en ciertas fabricaciones y en los laboratorios, ya como fuente de obtención de frío, para lo cual se hace que salga el líquido de la botella inclinándola suficientemente y se le deja correr por el espacio que hay que enfriar, en el cual se evapora rápidamente. Durante esta salida del líquido, que pasa bruscamente de la presión de vapor a la presión atmosférica, puede ocurrir, como en el caso del anhídrido carbónico, que la disminución de la temperatura sea suficientemente grande para que una parte del líquido o de su vapor se congele; así se prepara la nieve carbónica, que puede emplearse inmediatamente para mantener un refrigrante a una temperatura aproximada de — 80° C. Entonces puede utilizarse la nieve carbónica sola o mezclada con un líquido difícilmente congelable, como el éter.

La aplicación principal de los gases liquidados es la fabricación de hielo y la refrigeración de locales destinados a la conservación de substancias putrescibles. En las instalaciones creadas a este efecto se obtiene la licuefacción del gas mediante el dispositivo indicado esquemáticamente (*fig.* 153), y que se compone de un aparato compresor y de un condensador. El líquido, al salir del condensador, pasa a un refrigerante, que puede estar constituido de formas muy variadas y del que la figura 155 da un esquema de montaje. Dos cuerpos cilíndricos A y B, colocados paralelamente, se reúnen por su parte inferior mediante tubos en U más o menos numerosos, según sea el tamaño del refrigerante. El gas liquidado llega al cuerpo A, desciende a los tubos C, donde se vaporiza mientras se dirige al cuerpo B, y es finalmente aspirado por la bomba de compresión. Todo el conjunto está sumergido en una cubeta que contiene una solución incongelable D, cuya temperatura disminuye. Entonces es cuando se emplea la solución enfriada, ya para obtener la congelación del agua en los moldes en los cuales se coloca, ya para enfriar los locales en los cuales se han dispuesto, en la parte superior de las piezas, tuberías que son enfriadas al ser recorridas por la solución.

Fig. 155

Higrometría

Mezcla de gas y vapor. — Es sabido (v. pág. 44) que la vaporización de un líquido en un recinto de volumen limitado queda restringida a la producción de una cantidad de vapor suficiente para que este vapor tenga una presión propia (presión parcial) igual a la tensión máxima de vapor a la temperatura considerada, cualquiera que sea la presión del gas que contiene el recinto.

Llamando f a la tensión del vapor líquido, saturante o no, y v al volumen del recinto, podrá calcularse la masa de agua vaporizada m_1 por la fórmula

$$m_1 = v \cdot \rho \frac{f}{76} \frac{1}{1 + \alpha t},$$

en donde ρ representa la masa de un centímetro cúbico de vapor reducido a la presión normal y a 0° C; ρ será igual, por ejemplo, a la masa de un centímetro cúbico de aire, multiplicado por la densidad del vapor con respecto al aire, $\delta = 0{,}622$. Por consiguiente,

$$\rho = 0{,}001293 \times 0{,}622 = 0{,}000804.$$

La masa m_2 de aire en el volumen v, que está sometido a la presión $H - f$ y a la temperatura t, será

$$m_2 = 0{,}001293\, v \frac{H - f}{76} \frac{1}{1 + \alpha t},$$

y la masa total de la mezcla m

$$m = m_1 + m_2 = 0{,}001293\, v \frac{H - 0{,}378\, f}{76} \frac{1}{1 + \alpha t}.$$

El caso especial de la presencia del vapor de agua en el aire tiene gran importancia práctica y merece un examen particularmente detallado; constituye el objeto de la parte de la física denominada *higrometría.* No obstante, salvo ciertos aparatos de medidas, todo lo relacionado con este caso especial puede aplicarse completamente a otros líquidos volátiles y a una atmósfera gaseosa cualquiera.

En particular, la velocidad de evaporación V del líquido (masa de líquido evaporada durante la unidad de tiempo) depende, en todos los casos, de la tensión máxima de vapor F de este líquido a la temperatura de la experiencia y de la presión f que existe en ese momento, de la superficie s de evaporación y de la presión total H. Esta velocidad V puede expresarse por la relación

$$V = K_s \frac{F - f}{H},$$

en la que el coeficiente K depende exclusivamente de la naturaleza del líquido (si se opera en una atmósfera tranquila), pero que es tanto mayor cuanto más vivamente se agite el gas.

De esta fórmula se deduce que la velocidad será máxima cuando f sea nula, es decir, igual al principio de la puesta en contacto del líquido con el gas, y que es infinita si la presión H del gas es nula, es decir, en el vacío. Al contrario, será muy pequeña cuando la presión H del gas sea grande y tenderá hacia cero cuando la presión parcial del vapor se aproxime a la presión del vapor saturante.

En todos los casos, la agitación del gas, que facilita la difusión del vapor en su masa y que distribuye la capa de vapor saturante que se forma en contacto con el líquido, es apta para acelerar el equilibrio de las tensiones.

Humedad de la atmósfera. — Como la tensión del vapor de agua saturante, a la temperatura ordinaria, es sólo de 1,28 cm de mercurio aproximadamente a 15° C y de 1,75 cm a 20° C es fácil darse cuenta de la importancia que puede tener la humedad del aire sobre la evaporación del agua a la temperatura ambiente.

Por definición, se dice que el *estado higrométrico* E del aire es igual a la relación entre la presión efectiva del vapor en el aire, f, y la presión máxima del vapor F a la temperatura a que se encuentra:

$$E = \frac{f}{F}.$$

El número E es igual a la unidad cuando la atmósfera está saturada ($f = F$). En la práctica, suele expresarse el valor de E en tanto por ciento del máximo F.

La humedad de la atmósfera se debe a numerosas causas; entre las principales citemos la evaporación del agua y de la humedad que impregna los objetos a causa de las lluvias o de condensaciones producidas por el frío nocturno; también se debe a la respiración de los animales y a la combustión de todas las materias hidrogenadas (madera, gas de alumbrado, hullas, etc.).

El conocimiento del estado higrométrico del aire es necesario en numerosas industrias, especialmente en todos los casos en que se trate de desecaciones al aire, que sólo se consiguen cuando la atmósfera no está saturada. La velocidad a que se produce la desecación es proporcional a $(M - f)$, y está determinada por el valor de E y de F:

$$F - f = F\,(1 - E),$$

en donde F se conoce por su valor dado por las tablas de tensión de vapor del agua para cada temperatura, y E, por los aparatos denominados *higrómetros*, que describiremos a continuación.

Existen métodos directos para medir la cantidad de agua contenida en un volumen de aire determinado. El más sencillo consiste en que el aire que se va a estudiar pase por materias capaces de absorber su humedad, tales como el ácido sulfúrico o el anhídrido fosfórico. La substancia secante se coloca entonces en tubos en forma de U, que se pesan antes del ensayo. Se hace que el aire atraviese estos tubos, midiendo el volumen que pasa por ellos, y se determina después el aumento de masa de los tubos. La diferencia de los pesos anterior y posterior al paso del aire da la masa de agua m que contiene el volumen v a la temperatura t. Puede entonces deducirse fácilmente el valor de f y, por consiguiente, el de E.

Se tendrá $m = v \cdot \rho \dfrac{f}{76} \dfrac{1}{1 + \alpha t}$ (v. columna anterior),

en donde ρ, masa específica del vapor, es igual a 0,000 804. Se obtiene entonces

$$= \frac{m \times 76\,(1 + \alpha t)}{0{,}000804\, v}.$$

F es dada por las tablas de constantes, en función de la temperatura ambiente, previamente determinada.

Ciertos aparatos permiten obtener medidas mucho más rápidas, e incluso E por lectura directa. Esos aparatos se fundan en principios bastante diversos.

Higrómetros. — Aparatos de punto de rocío. — Estos instrumentos se basan en el hecho bien conocido de que si se enfría el líquido contenido en un recipiente por debajo de cierta temperatura, el agua de la atmósfera se condensa en la superficie exterior de la pared. La temperatura a partir de la cual se produce la condensación se denomina *punto de rocío.* A esta temperatura, la tensión f del aire a la temperatura primitiva t_1 se convierte en presión de vapor saturante; se anota esta temperatura t_2, y la tabla de tensiones del vapor de agua da el valor f a t_2°, así como el valor F a t_1°.

Entonces, se deduce $E = \frac{f}{F}$.

El aparato que permite obtener esta medida consta de una botella metálica pequeña A, una de cuyas caras, B (*fig* 156), es lisa y bien pulida. En esta botella se coloca éter, que se evapora más o menos rápidamente por efecto de la corriente de aire de una pera P de goma. La temperatura es indicada en cada instante por un termómetro sumergido en el éter. La cara metálica B está rodeada por un bastidor C colocado en el mismo plano y del mismo metal pulimentado que la botella; no está en contacto con ésta y conserva la temperatura del aire ambiente. Como no está impregnado por el rocío, sirve de contraste a la cara B, sobre la cual puede apreciarse la más mínima condensación.

Fig. 156

Psicrómetros. — Estos aparatos se fundan en el hecho de que la evaporación del agua es tanto más rápida cuanto mayor es la diferencia (F — f). Esta evaporación se manifiesta por un enfriamiento del agua que se evapora. Si se emplean dos termómetros A y B (*fig.* 157) idénticos, montados en un mismo soporte S, uno al lado del otro, y si el depósito del termómetro A está rodeado por una mecha de algodón que se mantiene húmeda por el agua que fluye lentamente del tubo C, el termómetro A se enfriará con respecto a B, y podrá deducirse de la diferencia de temperaturas, por medio de una tabla establecida empíricamente, el valor de f en centésimas de F a la temperatura dada por B.

Higrómetros capilares. — El higrómetro de Saussure se basa en que las substancias del cabello son sensibles a la humedad de la atmósfera, que absorben hasta una concentración límite que depende de la presión exterior del vapor de agua. La dilatación del cabello se manifiesta por un alargamiento, que puede medirse amplificándolo.

Esquemáticamente, el aparato de Saussure se compone de un cabello AB que se sujeta en A (*fig.* 158) a un punto fijo, arrollándolo sobre una polea pequeña P y sometiéndolo a la tensión de un peso E por su parte inferior. La polea P lleva una aguja C que se desplaza sobre el limbo graduado D, dando el valor f en centésimas de F, por lectura directa.

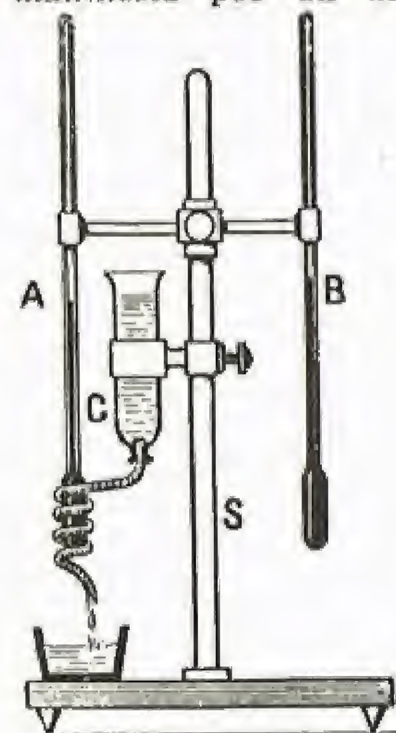


Fig. 157

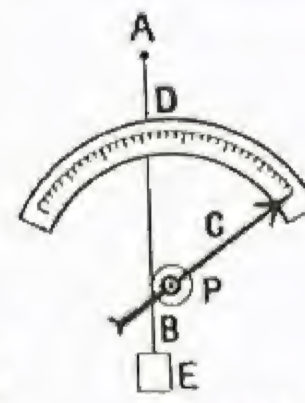
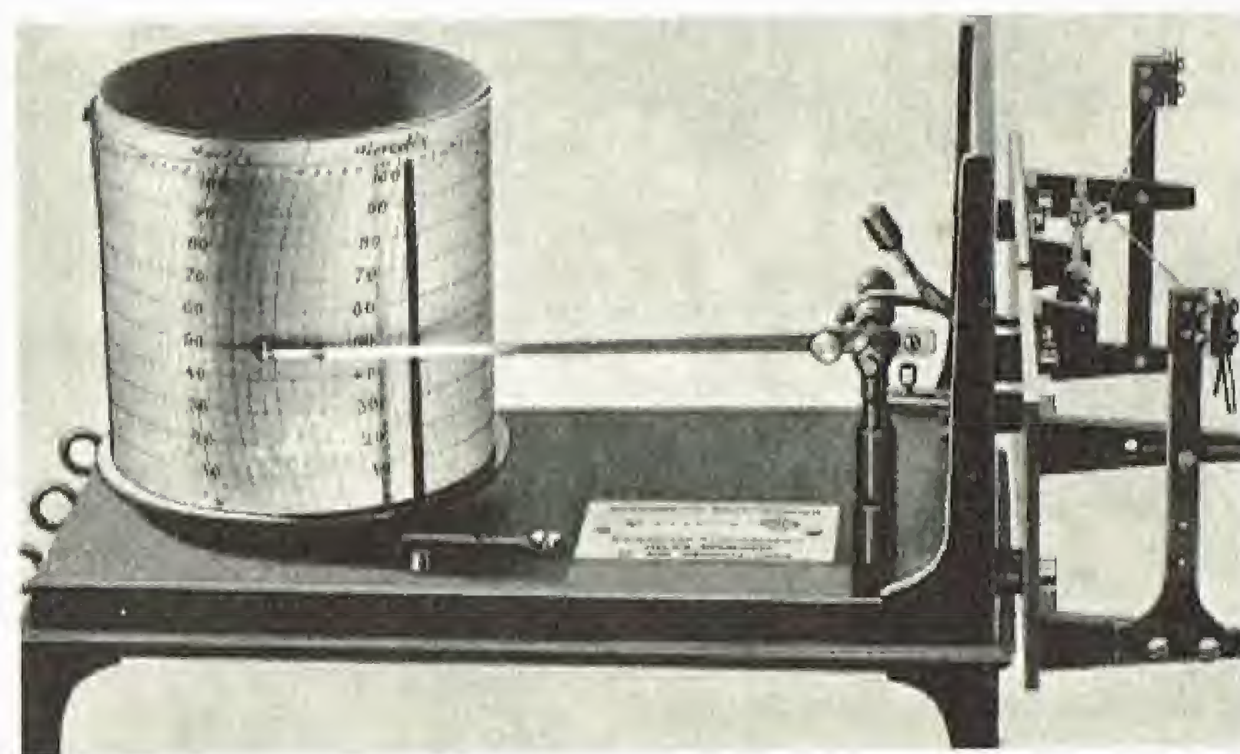


Fig. 158

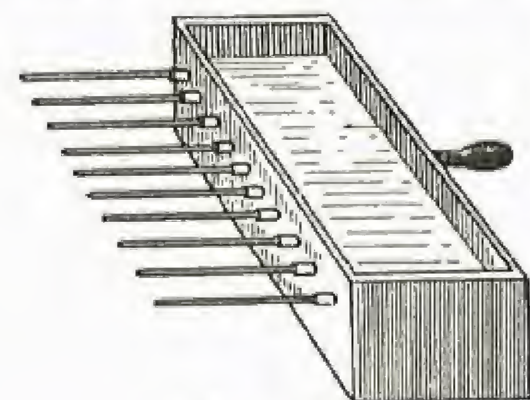
En estos aparatos suele reemplazarse el cabello por crines o fibras textiles diversas, cartón de bristol, etc., materias que tienen la propiedad común de producir el mismo resultado con mayor o menor amplitud. Este mismo dispositivo permite la construcción de aparatos registradores que indican las variaciones de la humedad del aire en función del tiempo.


Higrómetro de inscripción (*Fot. Meteorología, Nacional, París*)

Conducción del calor

Conductibilidad de los sólidos. — Puede observarse fácilmente que todos los cuerpos sólidos no transmiten igualmente el calor. Una varilla de vidrio sostenida a mano puede someterse a la acción de una llama en una de sus extremidades, ponerse al rojo e incluso fundirse sin que la temperatura que existe en la misma varilla a unos centímetros de distancia sea intolerable al que efectúa la experiencia. No ocurre lo mismo con la mayoría de los metales, principalmente con la plata y el cobre.

La propagación del calor en los sólidos, que se produce por contactos sucesivos desde los puntos calentados a los que lo son menos, depende, por consiguiente, de una propiedad específica de la materia que los compone, que se denomina *conductibilidad térmica.*


Fig. 159

Una experiencia de Ingenhousz permite comparar las conductibilidades de los cuerpos mediante un aparato formado por una cuba metálica de forma paralelepipédica (*fig.* 159), a una de cuyas caras verticales se han fijado varillas de la misma longitud y del mismo diámetro, pero de substancias diferentes. El interior de la cuba se llena de agua, que se hace hervir. Se cubren previamente con cera o con parafina las varillas laterales y se observa cómo la fusión de la cera va avanzando progresivamente sobre las mismas. Esta progresión es rápida al principio, y después se va haciendo cada vez más lenta hasta estacionarse a una distancia tanto mayor de la cuba cuanto mejor conductora es la varilla.

En este tipo de experiencias, la longitud de la varilla medida no es proporcional a la conductibilidad del metal, ya que por la varilla sólo se propaga una parte del calor, cediéndose el resto al aire ambiente a través de la superficie. El cálculo, teniendo en cuenta este término, conduce a mostrar que la conductibilidad real de cada varilla es proporcional al cuadrado de la longitud sobre la cual se ha fundido la cera. Como la plata es el cuerpo de mayor conductibilidad entre todos los cuerpos ensayados, se la puede tomar como base y dar a su conductibilidad el valor 100.

El coeficiente absoluto de conductibilidad de un cuerpo, de forma de placa, es la cantidad de calor que entra o sale durante la unidad de tiempo por la unidad de superficie cuando su espesor es igual a la unidad de longitud y la diferencia entre las temperaturas extremas de 1° C. En el cuadro siguiente se dan los valores de estos coeficientes, ya en comparación con la plata (coeficiente relativo), ya en valor absoluto (C. G. S.).

CUERPOS	COEFICIENTES	COEFICIENTES ABSOLUTOS
Plata	100	82
Cobre	74	60
Oro	53	43
Latón	24	19
Cinc	19	15
Estaño	14	12
Hierro	12	10
Acero	12	9,5
Plomo	8,5	6,9
Platino	8,4	6,8
Paladio	6,3	5,2
Bismuto	1,8	1,5

Conductibilidad de los líquidos y de los gases. — La propagación del calor en los cuerpos fluidos (líquidos o gaseosos) se efectúa simultáneamente de dos formas:

1° Por contactos sucesivos, como en el caso de los sólidos; es la conductibilidad propiamente dicha;

2° Por convección, es decir, por desplazamiento del fluido procedente de las partes calentadas a causa de la variación de su densidad.


Fig. 160

La convección, aparte el caso de los metales líquidos cuya conductibilidad es muy elevada representa el término más importante de la propagación del calor en el seno de una masa líquida.

Cuando se llena un vaso de agua con polvos dispersos sobre su masa, como serrín de madera, y se le calienta a la llama por su parte inferior, el líquido que sufre la acción directa de la llama se dilata, disminuye de densidad y tiende a ascender hacia la parte superior; se establece entonces una corriente ascendente, hacia las paredes exteriores del vaso, del líquido caliente (*fig.* 160), y un retorno descendente, a lo largo del eje, de las partes más frías que lo reemplazan.

En los gases, estos movimientos de convección son todavía más acentuados a causa de su extrema movilidad y de que su dilatación es mucho mayor que la de los líquidos.

Estos efectos de convección hacen muy difícil la medida de la conductibilidad verdadera de los cuerpos en estado líquido o gaseoso, tanto más cuanto que esta conductibilidad es siempre pequeña con respecto a la convección. No obstante, se han hecho determinaciones en vasos que se han calentado por su parte superior, de forma que las partes en contacto con una fuente de calor uniforme en todos los puntos de la superficie no tengan que desplazarse a causa de su variación de densidad. Para la conductibilidad del agua dieron un valor absoluto de 0,0933. Las soluciones acuosas de sulfato de cinc dan valores más elevados que el agua, pero las soluciones de ácido sulfúrico o de cloruro sódico tienen, en cambio, menor conductibilidad.

En el caso de los gases interviene, además, otra causa que aumenta todavía la incertidumbre de los resultados observados en las medidas. Esta causa es la radiación del calor, de la que se hablará más adelante.

Las numerosas experiencias hechas para aclarar la cuestión de si los gases poseen realmente una conductibilidad o si ésta debe considerarse como nula, conducen al resultado de que su valor es siempre muy pequeño, pero que no es el mismo para todos los gases y que varía con la temperatura y la presión, sobre todo para las presiones muy bajas.

Los números siguientes expresan el valor de la conductibilidad absoluta de ciertos gases, a 0° y a la presión de 76 cm de mercurio.

Aire	0,000048
Óxido de carbono	0,000048
Anhídrido carbónico	0,000040
Hidrógeno	0,000336

Calor radiante

Reseña histórica. — En el siglo XVIII, apenas se tenían nociones sobre el calor radiante; se había observado que los rayos luminosos concentrados por los espejos inflamaban cuerpos, y, por consiguiente, se sabía que el calor acompañaba a la luz. Lambert fue quien primeramente señaló en 1779 la existencia de rayos caloríficos no luminosos.

Herschel mostró, en 1802, que las leyes de la refracción y de la reflexión se aplican a los rayos caloríficos o infrarrojos. Bérard reconoció, hacia 1825, que es posible polarizar estos rayos. **Fizeau** (1819-1896) y **Foucault** (1819-1868), en 1842, hicieron interferir los rayos obscuros. **Kirchhoff** (1824-1887) enunció la ley de su nombre sobre los poderes absorbentes y emisivos, en 1859; la ley de **Stefan** (1835-1893) es de 1879, y la de **Wien** (1864-1932), de 1890.

Calor radiante. — Los cuerpos calientes emiten en el espacio rayos, llamados *caloríficos*, que sólo difieren de los luminosos, a los que acompañan, por su mayor longitud de onda. No es necesario que el cuerpo caliente alcance una temperatura bastante elevada para que exista esta radiación. Un balón lleno de agua hirviendo emite radiaciones que pueden estudiarse como se han estudiado las de la luz (v. RADIACIONES, pág. 167 y siguientes). No obstante, las propiedades de los rayos caloríficos son diferentes de las radiaciones de longitud de onda más pequeña, y resumiremos a continuación algunas particularidades de las mismas.

En el estudio del espectro solar se distinguen tres partes: los rayos ultravioletas, cuyas longitudes de onda son las más cortas; los rayos luminosos, que componen toda la parte visible del espectro, y los rayos infrarrojos o caloríficos, que son los que tienen longitudes de onda mayores.

La mayoría de las fuentes luminosas emiten una radiación obscura en el campo de las longitudes de onda menores y mayores que las de los rayos luminosos. Las diversas partes de estas radiaciones no están exactamente limitadas, es decir, que el comienzo del espectro luminoso no es el final del espectro calorífico. En realidad, no existen rayos puramente caloríficos, sino solamente longitudes de onda de rayos que ya no impresionan de manera apreciable al ojo que los recibe.

En el estudio de esta radiación, el ojo es substituido, como instrumento de detección, por una pila termoeléctrica sensible unida a un galvanómetro, y cuando se desplaza esta pila en un espectro, se comprueba que los rayos infrarrojos producen desviaciones en el galvanómetro.

La radiación calorífica, como las restantes, es más o menos absorbida por todas las substancias que atraviesa, pero las propiedades de absorción de un cuerpo dependen de la longitud de onda de la radiación.

Los cuerpos que, como el vidrio, son transparentes a la luz, absorben los rayos caloríficos y se dice que son *atérmanos;* el cloruro de sodio, por el contrario, es *diatérmano*, es decir, transparente no sólo a los rayos luminosos, sino a los de mayores longitudes de onda.

La emisión de la radiación de los cuerpos calientes representa para los mismos una pérdida de energía, y su temperatura desciende durante esta emisión una magnitud que depende de la temperatura y la superficie de emisión, pero también de un coeficiente característico de la naturaleza de esta superficie, denominado *poder emisivo*. El poder emisivo es máximo en los cuerpos negros, en los cuales es, por definición, igual a la unidad. Las superficies brillantes y reflectoras tienen un poder emisivo muy débil.

He aquí el poder emisivo de algunos cuerpos:

Negro de humo ...	1,00	Plomo empañado ...	0,45
Vidrio	0,9	Plomo brillante ...	0,20
Minio	0,8	Hierro pulimentado	0,15
Plombagina	0,75	Plata, oro	0,12

Cuando una superficie recibe una radiación, se calienta en un grado que depende de la cantidad de calor que aporta dicha radiación y del estado de la superficie, o, como se dice, de su *poder absorbente*. Si esta superficie es reflectora, la radiación se absorbe parcialmente; si el cuerpo es negro, es completamente absorbida. Los valores de los poderes absorbentes son muy variables, según la naturaleza de la radiación.

Propiedades de las soluciones

Reseña histórica. Fenómenos de disolución. Enfriamiento de las soluciones. Punto de eutexia. Solubilidad de los líquidos. Solubilidad de los gases. Crioscopia. Ebulliosocopia y tonometría. Fenómenos osmóticos. Disociación de los electrólitos en solución

Reseña histórica. — La sobresaturación fue descubierta por Jean Tobias Lowitz, en 1785. **Dalton** estudió las soluciones gaseosas en 1802 (ley de mezcla de los gases). **Henry** (1799-1878) descubrió en 1803 la ley que rige la cantidad de gas disuelta por un líquido, que fue verificada por Bunsen en 1855.

Gay-Lussac estudió, en 1819, la solubilidad de un sólido en un líquido en función de la temperatura. Abaschew (1854), Alexejew (1875) y Rothmund (1898), estudiaron la solubilidad de los líquidos en los líquidos.

Raoult (1830-1901) estudió desde 1882 las soluciones diluidas y descubrió las leyes que llevan su nombre, cuya teoría fue expuesta por **Van't Hoff** (1852-1911). Finalmente, **Arrhenius** (1859-1927) formuló la teoría iónica de su nombre en 1887.

Fenómenos de disolución. — Al poner en contacto una substancia sólida, líquida o gaseosa con un líquido, puede observarse, según la naturaleza de los cuerpos empleados, la coexistencia de dos fases distintas o su unión para formar una fase única, líquida o sólida, según los cuerpos empleados y sus proporciones.

Si se trata de un sólido cristalizado puro o de un líquido igualmente puro, se dice que hay disolución del sólido en el líquido cuando toda la masa se hace líquida y sólo forma una fase única.

El cuerpo líquido se denomina entonces *solvente*, y el sólido, *soluto;* se define, en general, la composición de la solución por el valor de la *concentración en masa*, cociente de las masas correspondientes de soluto y de solvente.

Habitualmente, el fenómeno de disolución simple de un sólido en un líquido no se produce completamente más que cuando la cantidad relativa de sólido no excede de cierto valor. Es decir, se distingue entre solución *no saturada*, capaz de disolver una cantidad suplementaria de soluto sólido, y *solución saturada*, en equilibrio con un exceso de soluto. Para éste se define el *coeficiente de solubilidad*, que es la masa de soluto disuelta en 100 gramos de solvente cuando la solución está saturada.

A una misma temperatura, el cociente de solubilidad depende de la naturaleza del solvente y del soluto. A la temperatura de 15° C, por ejemplo, 100 gramos de agua disuelven como máximo 36 gramos de cloruro de sodio, 60 gramos de cloruro de calcio y sólo 10 gramos de bicromato de potasio.

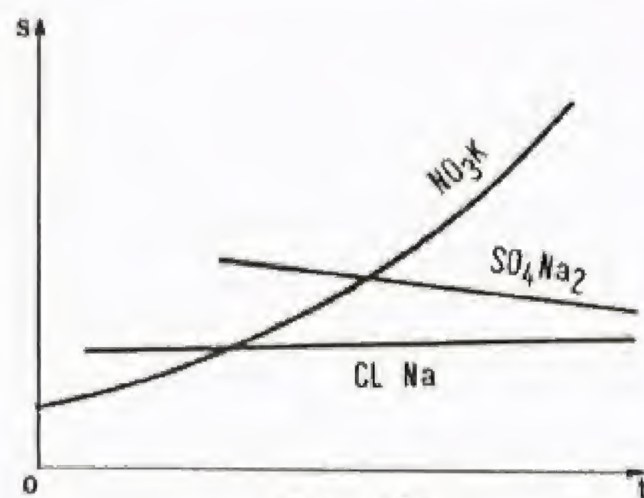


Fig. 161

Para una misma solución, el coeficiente de solubilidad depende de la temperatura y suele aumentar generalmente con ella. Así ocurre cada vez que el fenómeno de disolución absorbe calor. Así, los coeficientes de solubilidad del nitrato de potasio en el agua son: 13 a 0° C, 82 a 50° C y 247 a 100° C, por ser este cuerpo mucho más soluble en ca-

liente que en frío. No obstante, hay ciertas excepciones. El cloruro de sodio, por ejemplo, tiene una solubilidad casi constante, puesto que varía, de 36 a 0° C, sólo hasta 39 a 100°. Para el sulfato de sodio anhidro, su solubilidad, que vale 49 a 40° C, es sólo 42 a 100° C por ser menos soluble este cuerpo en caliente que en frío.

Las *curvas de solubilidad* representan estos resultados, y dan el valor del coeficiente de solubilidad s en función de la temperatura t. La figura 162 muestra las curvas de las soluciones precedentes.

Ocurre a veces que las curvas de solubilidad presentan uno o varios puntos angulosos llamados *puntos de transición*. Esto constituye una indicación de que el solvente y el soluto pueden combinarse químicamente. Muchos de estos cuerpos, en particular, forman con el agua compuestos definidos, llamados hidratos. Para representar su solubilidad, se indica en ordenadas la masa de la sal anhidra que corresponde a una masa total de 100 gramos de agua contenidos en la solución. Según la temperatura, el sólido en equilibrio con la solución puede ser el cuerpo anhidro o uno de sus hidratos. La figura 162 representa la solubilidad en el agua del carbonato de sodio, donde se ve un máximo que corresponde a 38° C.

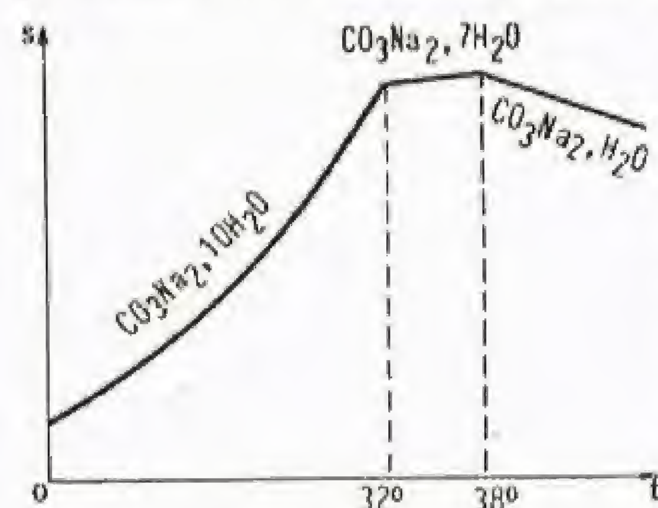


Fig. 162

Las mencionadas curvas representan el equilibrio de la solución líquida con un exceso de soluto sólido. La región inferior corresponde evidentemente a la solución no saturada; su disposición relativa muestra cómo puede procederse, a partir de una solución no saturada, si se quiere obtener la cristalización del cuerpo disuelto.

Puede operarse primeramente aumentando la concentración a temperatura constante, operación que se efectúa por evaporación del solvente. Es el método más corrientemente utilizado, que permite, entre otras cosas, recuperar la sal por evaporación del agua del mar en las salinas. Los cristales obtenidos son tanto mayores cuanto más lenta es la cristalización.

El otro método, que se aplica a los cuerpos cuya solubilidad aumenta con la temperatura, consiste en partir de una solución caliente suficientemente concentrada. Cuando se alcanza, por enfriamiento, la temperatura ordinaria, se ha cristalizado todo el sólido que estaba disuelto a la temperatura inicial, y que se encuentra en exceso sobre el que es soluble a la temperatura final, menos elevada. Este procedimiento se emplea frecuentemente para purificar los cuerpos cristalizados.

En ambos casos, puede ocurrir que la cristalización no se produzca por sí misma cuando la solución se satura. Ésta permanece completamente líquida, aun concentrándose más que la solución saturada a la misma temperatura. Este fenómeno, comparable a la sobrefusión, se denomina *sobresaturación*. En el diagrama, las soluciones *sobresaturadas* corresponden a los puntos situados encima de la curva de solubilidad. Se trata de un estado de falso equilibrio que desaparece al añadir a la solución un cristal pequeño del cuerpo disuelto o de un cuerpo isomorfo.

La sobresaturación se observa muy fácilmente en las soluciones acuosas de sulfato de sodio y en las de hiposulfito de sodio. En el estado sobresaturado puede obtenerse una solución de alumbre de potasio (sulfato doble de aluminio y potasio); puede entonces provocarse la cristalización añadiendo un cristal del mismo cuerpo o un cristal isomorfo de sulfato doble de cromo y potasio.

Si se disuelven varias sales no isomorfas en agua y se pueden mantener en estado de sobresaturación, al añadirse un cristal de cualquiera de ellas se provoca la cristalización de la sal a la que pertenece y no de las restantes, que continúan en solución. Este medio permite separar una parte de una de las sales en solución, en estado puro.

Enfriamiento de las soluciones. Punto de eutexia. — El método de enfriamiento de las soluciones no saturadas permite estudiar el fenómeno de la disolución de una forma mucho más completa que la investigación directa de la saturación, y es necesario reanudarla a fin de examinar todas las posibilidades. Para representar los resultados por un gráfico, se indicarán las temperaturas en abscisas, y en ordenadas el índice, que es el cociente entre la masa del cuerpo disuelto y la masa total de la disolución, de forma que se respete la simetría existente entre solvente y soluto. Este índice puede variar desde 0 (solvente puro) hasta 1 (soluto puro).

Empezaremos por el caso más sencillo, en el que solvente y soluto no se combinan químicamente.

Si se enfría una solución no saturada, pero suficientemente concentrada, se llega a una temperatura a la cual, habiéndose evitado la sobresaturación, el cuerpo disuelto empieza a cristalizarse. El punto que representa este estado pertenece a la curva de solubilidad, como se ve en la figura 163. Al proseguirse esta transformación, al mismo tiempo que se continúa reduciendo la temperatura, este punto se desplaza sobre el diagrama, descendiendo hacia la izquierda, ya que la cristalización del soluto reduce el índice de la fase líquida. Este punto describe, pues, la curva de la solución saturada en soluto. La curva desemboca evidentemente en A, punto de ordenada 1, cuya abscisa es la temperatura de fusión del cuerpo disuelto puro. Al continuar el enfriamiento, el fenómeno cambia de naturaleza: a cierta temperatura, el solvente empieza a su vez a cristalizarse y el conjunto de la solución residual se toma en masa, formando una mezcla de proporciones constantes de los dos constituyentes sólidos. Este fenómeno, que se produce a una temperatura constante, es representado por el punto E, denominado *punto de eutexia*, y la mezcla formada, llamada *mezcla eutéctica*, tiene un punto de fusión y una composición fijos, como un cuerpo puro. Su estructura heterogénea muestra, no obstante, que se trata de una mezcla y no de una combinación. Puede también observarse que su composición varía de manera continua, si se hace variar de la misma forma la presión a la cual se opera.

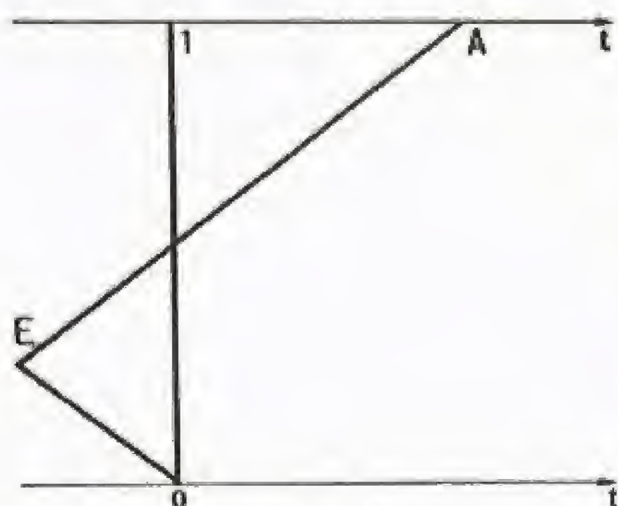


Fig. 163

Enfriemos ahora una solución suficientemente diluida. A una temperatura bastante baja, se comprueba que se congela primeramente el solvente. Su cristalización progresiva, al continuar durante el enfriamiento, aumenta el índice del líquido que subsiste. El punto correspondiente describe entonces una curva ascendente hacia la izquierda, que representa la solución saturada en solvente. El fenómeno acaba, como el anterior, por una cristalización de la mezcla eutéctica, y a la misma temperatura cuando el líquido ha tomado la composición correspondiente. El punto de eutexia E representa, por consiguiente, el equilibrio de tres fases: la solución líquida, el solvente y el soluto sólidos. Este equilibrio sólo es posible, para una presión dada, a una temperatura determinada y para un valor particular del índice de la solución.

De la misma forma que se ha podido obtener una solución sobresaturada en soluto, es posible, adoptando ciertas precauciones, llegar a una solución sobresaturada en solvente, denominada solución *subenfriada*. Se trata también de un estado de falso equilibrio, que cesa al contacto con un cristal del solvente; es representado por los puntos citados a la izquierda de la curva OE. Esta curva desemboca por su parte inferior sobre el eje de abscisas, en el punto de fusión del solvente puro, 0° si se trata de agua.

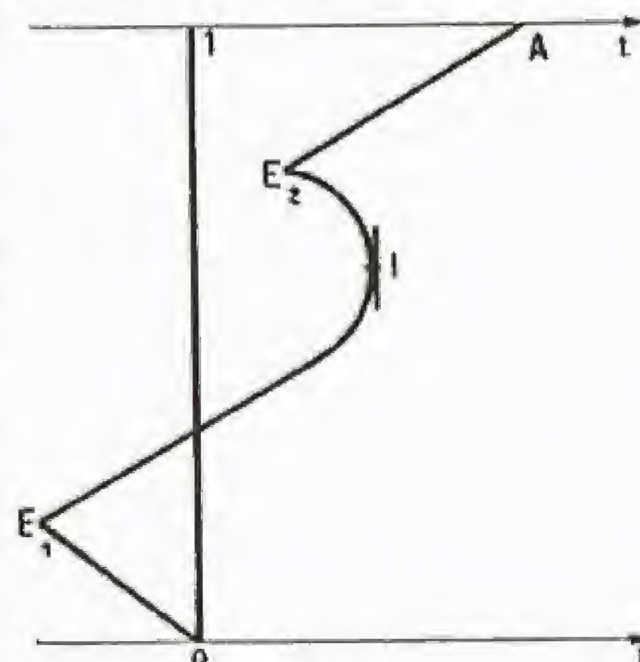


Fig. 164

La representación gráfica muestra que en realidad no existe diferencia alguna entre solvente y soluto, que tienen funciones simétricas: la solución de sal marina en el agua puede también considerarse como una solución de hielo en el cloruro de sodio fundido.

Cuando solvente y soluto dan lugar a una o varias combinaciones químicas, el fenómeno se complica. En el caso de una sola combinación, el diagrama es como el de la figura 164. Hay tres curvas de solubilidad, que se unen a dos puntos de eutexia E_1 y E_2: la curva OE_1 de solubilidad del solvente, la curva E_2A de solubilidad del soluto y la curva E_1E_2 de solubilidad de la combinación. Esta última curva presenta un punto I con tangente vertical, llamado *punto indiferente*, cuya ordenada representa el índice del soluto en la combinación sólida. La abscisa de este punto es la temperatura de fusión de la combinación. El aspecto de estas curvas se comprende fácilmente si se considera que cualquier mezcla cuyo índice es inferior al del punto indiferente es una solución de la combinación en el solvente, y que toda mezcla de índice superior es una solución de la combinación en el soluto fundido.

Cuando existen varias combinaciones de ambas constituyentes, corresponde a cada una de ellas una curva de solubilidad particular. Esta curva posee un punto indiferente, si la combinación no se descompone antes de alcanzar su temperatura de fusión. Si ocurre así, se encuentra un punto anguloso, denominado *punto de transición*, que une dos de estas curvas, como se ha dicho antes. El estudio del enfriamiento de las soluciones permite poner en evidencia la existencia de tales combinaciones y determinar, gracias a la posición del punto independiente, las fórmulas de constitución.

La existencia del fenómeno de eutexia permite explicar las propiedades de las *mezclas refrigerantes*. La más empleada es la mezcla de hielo y sal marina en proporción de 2 a 1, respectivamente. El punto de eutexia de la solución dado por estos dos cuerpos corresponde a una temperatura de — 22° C y a un índice de 0,30. Si se mezclan a la temperatura ordinaria dos sólidos, la mezcla no puede subsistir, ya que sólo permanece en equilibrio a temperaturas inferiores a la del punto de eutexia. Habrá, pues, fusión del hielo y disolución de la sal marina en el agua formada, transformaciones ambas que absorben calor. Si la mezcla no recibe calor del exterior, se enfriará, y el equilibrio sólo se obtendrá cuando el punto correspondiente haya alcanzado una u otra de las curvas de solubilidad, según que haya hielo o sal en exceso. Operando con una mezcla homogénea de concentración eutéctica, es posible aproximarse a la temperatura de eutexia, que es la más baja que se puede esperar obtener. Reemplazando la sal marina por cloruro de calcio, se puede llega a obtener una temperatura de hasta — 40° C.

El método que se emplea en las ciudades, en invierno, para fundir la nieve, que consiste en arrojar sobre ella sal marina, se basa en este mismo principio de que el hielo puro y la sal sólida no pueden permanecer en equilibrio en contacto mientras la temperatura exterior es superior a la que corresponde a la solución saturada de hielo; por consiguiente, la nieve se funde, como se desea. Así se explica también que el líquido de fusión esté siempre mucho más frío que la propia nieve.

Por la misma razón, pueden enfriarse las salmueras por debajo de 0° C sin congelarse, por lo que se las emplea en la industria frigorífica.

Conviene hacer otra observación, que origina cierto número de apli-

caciones industriales. Hemos dicho que, mientras la concentración del cuerpo disuelto era inferior a la concentración eutéctica, la disminución de la temperatura hasta la congelación permitía obtener hielo puro y que la solución restante se enriquecía en sal, lo que retrasaba la solidificación del agua restante.

El método de congelación es, pues, aplicable a la concentración de las soluciones, y es particularmente interesante cuando se trata de substancias disueltas, que son modificadas por la acción del calor o son demasiado volátiles para que puedan concentrarse fácilmente sin pérdida por evaporación. Pero no se puede, evidentemente, sobrepasar las proporciones de la mezcla eutéctica.

También se emplea para obtener agua pura, cuando sólo se dispone de agua del mar o de un agua salada cualquiera; esta aplicación es importante en los viajes largos, no haciendo indispensable la renovación frecuente de la provisión de agua dulce.

Solubilidad de los líquidos. — Cuando se mezclan dos líquidos puros, pueden presentarse tres casos:

1º *Insolubilidad absoluta.* Los líquidos se colocan por orden de densidad y forman capas distintas (ejemplo: aceite y agua);

2º *Solubilidades parciales, limitadas y mutuas.* Cada uno de los líquidos se disuelve hasta saturarse en el otro, y se está igualmente en presencia de capas de líquidos superpuestos, que son dos soluciones saturadas (ejemplo: agua, éter);

3º *Miscibilidad completa.* Los dos líquidos se disuelven mutuamente y en todas proporciones, formando una solución única (ejemplo: agua y alcohol).

El primer caso de insolubilidad absoluta es tan raro, que apenas se aplica más que a las mezclas de aceite o de mercurio con otro líquido. Estos dos tipos de cuerpos, materias grasas y metales fundidos, tienen la propiedad, casi exclusiva, de no ser mojados por numerosas substancias líquidas, entre ellas el agua.

Los otros dos casos son, al contrario, muy frecuentes. A temperaturas bajas, cuando las solubilidades son pequeñas, hay más tendencia a la separación en dos capas y, al elevar la temperatura, se llega, en general, a la miscibilidad total, aunque entonces haya frecuentemente necesidad de operar a presión para alcanzar temperaturas superiores a las de ebullición de uno, o incluso de los dos líquidos.

En la disolución de los sólidos, se hace una diferencia entre el solvente y el cuerpo disuelto, basada en el simple hecho de que el primero es líquido y el segundo sólido. Cuando se trata de dos líquidos, si la solución de uno en el otro se limita a una saturación fija para cada temperatura, el líquido disuelto es aquel cuya proporción en la mezcla no puede aumentarse por encima de cierto valor, que es la saturación. Pero cuando ambos líquidos son miscibles, la distinción entre el solvente y el líquido disuelto es absolutamente convencional, y se denomina habitualmente "cuerpo disuelto" al que se encuentra en menor cantidad.

Las mezclas de líquidos van acompañadas por fenómenos térmicos, así como por una variación de volumen. Existe, por ejemplo, reducción de volumen en el caso de una mezcla de agua y alcohol, que se produce con desprendimiento de calor; al contrario, al disolverse alcohol en éter, se produce reducción de volumen, pero acompañada por una absorción de calor; en cambio, se produce un aumento de volumen si se mezclan alcohol y sulfuro de carbono, produciéndose la disolución con absorción de calor.

Solubilidad de los gases. — La solubilidad de los gases disminuye cuando aumenta la temperatura, es decir, inversamente a lo que sucede, en general, con los sólidos. Esta diferencia puede explicarse si se observa que la disolución de un sólido es una transformación de sólido a líquido que se produce con absorción de calor, como la fusión, mientras que la disolución de un gas es una transformación inversa, de gas a líquido, que desprende calor; se comprueba, en efecto, que el desprendimiento de calor que se produce durante la disolución de los gases muy solubles en el agua —como el amoniaco, etc.— es muy importante; en cambio, la disolución de las sales en el agua produce casi siempre un enfriamiento.

Los gases disueltos en un líquido tienen una tendencia muy marcada a dar soluciones sobresaturadas, es decir, que cuando se ha obtenido una solución de un gas en un líquido, a una temperatura determinada y a la presión normal, por ejemplo, puede elevarse apreciablemente la temperatura, o reducirse la presión, sin que el gas disuelto se evapore. El retraso que se produce puede compararse con el que se observa durante la ebullición (v. p. 45) debido a la necesidad de que haya una primera burbuja gaseosa que inicie la evaporación del gas disuelto. Basta con que se produzcan algunas burbujas de aire en la solución para que cese el estado de sobresaturación.

La solubilidad de los gases aumenta con la presión, según una ley de proporcionalidad para los gases de una solubilidad moderada (ley de Henry). Esta relación no es válida para los gases muy solubles, ya porque se combinan químicamente con el solvente, ya porque el volumen que ocupan en la solución es lo suficientemente reducido para obligarlos a adoptar un estado que puede considerarse como líquido.

Se comprueba que los gases más solubles en el agua son también, de una manera general, los más fáciles de licuar. El primero de ellos es el gas amoniaco, del cual se disuelven en un litro de agua 1 100 litros en condiciones normales (0º C y 76 cm de presión de mercurio).

Cuando varios gases se disuelven simultáneamente, cada uno de ellos lo hace proporcionalmente a su solubilidad propia y a su presión parcial en la mezcla (ley de Dalton). Así, el aire disuelto en agua contiene aproximadamente dos volúmenes de nitrógeno por un volumen de oxígeno, siendo el oxígeno dos veces más soluble que el nitrógeno.

Crioscopia. — De lo que acaba de decirse de las soluciones acuosas saturadas de las sales parece desprenderse que las leyes que rigen la solubilidad de estas materias son complejas y dependen, por lo menos, de la temperatura de fusión de la sal y de los hidratos que forman al combinarse con el agua.

Las propiedades de las soluciones diluidas son más simples e independientes de la naturaleza del sólido disuelto, exceptuada su masa molecular y su concentración. La ley que permite calcular la disminución de temperatura que se consigue añadiendo a un solvente una cantidad pequeña y conocida de un soluto determinado fue descubierta experimentalmente por Raoult, y lleva su nombre.

Cuando se enfría una solución muy diluida, se ha visto que el solvente empieza a cristalizarse a una temperatura determinada t', inferior a la temperatura de congelación t del solvente puro. La diferencia $\Delta t = t - t'$ se denomina *disminución del punto de congelación*, y obedece a la siguiente ley:

LEY DE RAOULT. *Para un solvente dado, la disminución del punto de congelación es proporcional a la concentración en masa e inversamente proporcional a la masa molecular del cuerpo disuelto.*

Esta ley, que es válida unicamente para concentraciones pequeñas y para soluciones no electrolizables, equivale a decir que la disolución de una molécula-gramo de un cuerpo cualquiera en una masa dada de solvente, cien gramos por ejemplo, produce una disminución constante de la temperatura de congelación, que se denomina disminución molecular. No depende de la naturaleza química del cuerpo disuelto, sino únicamente del solvente empleado.

Si se designan por m y m' las masas correspondientes de soluto y solvente, por c la concentración en masa y por M la masa molecular del cuerpo disuelto, se tendrá:

$$\Delta t = K \frac{m}{m'} \frac{1}{M} = K \frac{c}{M},$$

siendo K la *constante criométrica*, característica del solvente.

En el cuadro siguiente se indican los valores del coeficiente K para diversos solventes, así como sus temperaturas t de fusión:

SOLVENTES	t	K
Agua	0º C	1 850
Nitrobenceno	5,3	7 070
Benceno	5,5	4 900
Bromuro de etileno	9,7	11 800
Ácido acético	16,7	3 900
Fenol	39,0	7 400

La medida de la disminución de los puntos de fusión de las soluciones es de gran utilidad, en química, para la determinación de las masas moleculares de los cuerpos solubles. Son numerosos los cuerpos que no pueden calentarse sin que se descompongan antes de su ebullición, siendo entonces imposible determinar su densidad de vapor. Se opera en este caso aplicando la ley de Raoult a la congelación de las soluciones; el estudio de este fenómeno se ha denominado *crioscopia* o *criometría*.

Para efectuar las medidas crioscópicas puede utilizarse el aparato de la figura 165. Se compone éste de un recipiente A de vidrio, en el que se coloca un líquido que se mantiene a una temperatura algo inferior a la temperatura de congelación que ha podido determinarse. En este líquido se sumerge un tubo de ensayo B, que se mantiene vertical mediante un soporte S que descansa en el borde del recipiente A. Otro tubo de ensayo C, más pequeño, se sumerge en el tubo B con un termómetro sensible T que puede dar el 1/50 de grado por simple lectura de la graduación, y un agitador F. En el tubo C se van colocando sucesivamente solvente puro y la solución, y se determinan los valores respectivos de los puntos de fusión t y t' de estos dos líquidos.

Fig. 165

Para evitar los fenómenos de sobrefusión, se añade, de vez en cuando, por el tubo lateral D, un cristal pequeño de solvente, obteniéndose de esta forma el valor de la disminución $\Delta t = t - t'$.

Si se conoce la constante criométrica K del solvente utilizado y la concentración c de la solución, podrá obtenerse el valor de la masa molecular M:

$$M = K \frac{c}{\Delta t}.$$

Veremos más adelante que, en esta forma, la ley de Raoult no es aplicable a las soluciones electrolizables.

Ebullioscopia y tonometría. — Para una solución muy diluida, en la cual el soluto es poco volátil con respecto al solvente, la temperatura t', a la que comienza la ebullición de la solución, es superior a la temperatura de ebullición t del solvente puro. La diferencia $\Delta t = t' - t$ se denomina "elevación del punto de ebullición", y su estudio constituye el objeto de la *ebullioscopia* o *ebulliometría*. Esta cantidad obedece a una ley, debida también a Raoult, análoga a la de la criometría.

LEY DE RAOULT. *Para un solvente dado, la elevación del punto de ebullición es proporcional a la concentración en masa e inversamente proporcional a la masa molecular del cuerpo disuelto.*

Utilizando las mismas notaciones anteriores se tendrá:

$$\Delta t = K_1 \frac{c}{M}.$$

El coeficiente K_1, llamado *constante ebulliométrica*, y diferente del que se emplea en crioscopia, depende, como este último, únicamente del solvente.

Damos a continuación los valores de K_1 para algunos solventes que se utilizan corrientemente en la determinación de masas moleculares:

Éter	2 110	Alcohol	1 150
Benceno	2 670	Acetona	1 670
Cloroformo	3 660	Agua	520
Sulfuro de carbono	2 370	Anilina	3 220
Ácido acético	2 530	Fenol	3 040

Las medidas ebullioscópicas se utilizan, como las crioscópicas, en la determinación de las masas moleculares de los cuerpos solubles.

La ebullioscopia no es, por otra parte, más que una consecuencia de un fenómeno más general denominado *tonometría.*

Si en lugar de operar a la presión atmosférica, es decir, a presión constante, como en la ebullioscopia, y medir la diferencia de temperatura, se procede a la comparación del solvente puro y de la solución, a la misma temperatura y midiendo la diferencia de las presiones de vapor, se observará que la presión de vapor saturante f' de la solución es siempre menor que la presión de vapor f del solvente a la misma temperatura $t°$. Este hecho es únicamente válido si el cuerpo disuelto es mucho menos volátil que el solvente.

La ley de Raoult sobre las tensiones comparadas de los líquidos y de las soluciones que forman es la siguiente:

La disminución relativa de la tensión de vapor saturante $\frac{f-f'}{f}$ *es independiente de la temperatura, proporcional para cada solvente a la concentración en masa de la solución, e inversamente proporcional a la masa molecular del cuerpo disuelto.*

Podrá escribirse, pues:

$$\frac{f-f'}{f} = K_2 \frac{c}{M}.$$

La ventaja de este método, comparado con los precedentes, es que puede operarse a una temperatura cualquiera y, por consiguiente, se aplica a todos los casos, si la substancia que se estudia es soluble en un líquido que presenta una tensión suficiente.

Las tres leyes de Raoult son sólo aproximadas, de la misma forma que la ley de Boyle-Mariotte, por ejemplo. Su exactitud aumenta cuando la dilución de la disolución aumenta indefinidamente.

En todo caso, con la aplicación de la ley de Raoult a uno de estos tres métodos se poseen medios variados de determinación aproximada de las masas moleculares de los cuerpos; puede añadírseles la ley, de que se ha hablado anteriormente, de la densidad en el estado gaseoso o de vapor. Las masas moleculares así determinadas, por métodos muy diferentes, muestran una concordancia completamente satisfactoria en todos los casos en que varios de estos métodos pueden aplicarse a la misma substancia.

Fenómenos osmóticos. — Dutrochet descubrió, en 1826, que cuando se utilizaba una membrana animal o vegetal para separar el agua pura y una solución acuosa, se producía a través de la membrana difusión mutua de los dos líquidos, pero, en general, con predominio en un sentido. El sentido de mayor desplazamiento de líquido es generalmente del agua pura hacia la solución. La difusión a través de la membrana, en este sentido, se denomina *ósmosis positiva* o *endósmosis*, observándose también un movimiento inverso más lento, denominado *exósmosis.*

Existen, no obstante, membranas capaces de ser atravesadas por el agua pura, pero impenetrables a las moléculas de las substancias disueltas en este líquido. Con el nombre de membrana de Pfeffer o de tabique semipermeable, pueden prepararse vasos casi completamente impermeables a las materias sólidas disueltas en el agua (sales, azúcar..., etcétera). Esta membrana se prepara de la forma siguiente: se toma un vaso poroso A (*fig.* 166), que se llena con una solución de sulfato de cobre; se le sumerge exteriormente en un vaso que contiene una solución de ferrocianuro de potasio. Como se sabe, la reacción de estas dos sales da un precipitado gelatinoso de ferrocianuro de cobre que obtura los poros del vaso poroso. El vaso A preparado de esta forma está provisto de un tubo de vidrio B que sirve de manómetro, y que está obturado en la parte superior del vaso poroso. Para utilizar el instrumento denominado *osmómetro*, se coloca en el interior del vaso. A la solución que hay que ensayar, por ejemplo una solución de azúcar, y en el recipiente V, agua pura.

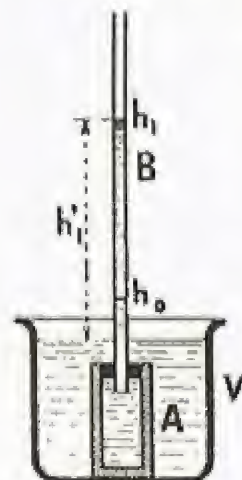


Fig. 166

Si el nivel del líquido en el tubo manométrico fuera al principio h_0, se verá cómo aumenta progresivamente su altura a causa del agua del vaso exterior que penetra en la célula, hasta que llega a una posición de equilibrio, en h_1, por ejemplo. En este momento existe equilibrio entre la tendencia del agua a diluir la solución de azúcar y la presión h'_1 entre el nivel del agua del vaso V y el de la célula, en el tubo B. Esta diferencia de nivel equilibra una cierta presión, denominada *presión osmótica* de la solución.

Ley de Van't Hoff. — Van't Hoff estudió las experiencias de Pfeffer, de las que dedujo la siguiente ley:

1° *La presión osmótica de una solución es proporcional a la concentración de la solución, que es el cociente entre la masa del cuerpo disuelto y el volumen que ocupa en la solución;*

2° *Dicha presión es proporcional a la temperatura absoluta;*

3° *Su valor numérico es igual al de la presión que produciría la substancia disuelta si se la pudiera vaporizar sin destruirla y hacer que ocupara el volumen de la solución.*

Supongamos que en el volumen V de la solución haya una molécula-gramo M de substancia disuelta, que la temperatura absoluta sea T y la presión osmótica observada π. Si R es la constante molecular de los gases perfectos, se tendrá, en virtud de la ley de Van't Hoff:

$$\pi V = RT.$$

Sea c la concentración de la solución

$$c = \frac{M}{V} \quad \text{o} \quad V = \frac{M}{c},$$

de donde, reemplazando V por su valor

$$\frac{\pi M}{c} = RT,$$

$$\pi = \frac{RTc}{M}.$$

Cuando en el vaso exterior del osmómetro se coloca en vez de agua pura una solución a una concentración mayor que la de la célula, el nivel del manómetro disminuirá a causa de que la presión osmótica del líquido de la célula es la menor, y entonces la solución se denomina *hipotónica;* en el caso contrario, la solución es *hipertónica*, y si las concentraciones moleculares son iguales y, por consiguiente, también lo son las presiones osmóticas, las soluciones se denominan *isotónicas.*

La ley de Van't Hoff expresa, por consiguiente, como las fórmulas anteriores que la representan, que las substancias en solución se conducen de la misma forma que si estuvieran en estado gaseoso, lo que no sorprende si se supone que el soluto se encuentra, como un gas, en forma de moléculas que se agitan incesantemente. Ello implica, además, que pueden aplicársele las leyes de Boyle-Mariotte y de Gay-Lussac. Es, pues, evidente, que la ley de Van't Hoff sólo es rigurosa dentro de los límites en que lo son estas otras leyes, es decir, en los casos en que los gases pueden considerarse como perfectos.

Un gas real se aproxima a un gas perfecto cuando su presión es muy pequeña, porque sus moléculas están suficientemente espaciadas. La ley de Van't Hoff es una ley límite válida para las soluciones infinitamente diluidas.

De la fórmula anterior que da el valor de la presión osmótica π en función de la masa molecular del cuerpo disuelto puede obtenerse esta otra

$$M = \frac{RTc}{\pi}.$$

En los párrafos anteriores se ha demostrado que esta misma constante M de cada cuerpo soluble podía determinarse de formas diferentes mediante la crioscopia, la ebulliometría, la tonometría y la osmometría.

Es, pues, posible demostrar las tres leyes de Raoult como derivadas de la teoría de Van't Hoff.

Disociación de los electrólitos en solución. — Se ha comprobado, no obstante, al aplicar estos métodos, que no eran exactos en el caso de los medios electrolíticos, es decir, de soluciones que son conductoras y susceptibles de descomponerse por la corriente eléctrica.

En este caso, la fórmula

$$\pi = \frac{RTc}{M}$$

debe reemplazarse por:

$$\pi = i\,\frac{RTc}{M}.$$

El coeficiente i, siempre mayor que 1, se determina en cada caso de acuerdo con la teoría de S. Arrhenius (1887), que admite que los electrólitos disueltos se descomponen parcialmente en sus iones por el sólo hecho de la disolución.

$ClNa$ da 2 iones Na^+ y Cl^-

SO_4Na_2 da 3 iones $2Na^+$ y $SO_4^{=}$, etc.

Para obtener el número de partículas contenidas en la solución, número que puede determinarse por la presión osmótica, habrá que tener en cuenta la disociación. Se admite, en efecto, que la presión osmótica es proporcional no al número de moléculas disueltas en un volumen dado de solución, sino al número total de partículas, comprendiendo bajo este término tanto las moléculas no disociadas como los iones. Lo mismo sucede con las magnitudes criométricas, ebulliométricas y tonométricas, de donde resultan diversos métodos posibles para la medida del coeficiente de ionización de un electrólito.

Energía

Formas de la energía: Definición de la energía. Energía mecánica. Conservación de la energía mecánica. Energía calorífica. Otras formas de energía: eléctrica, química, radiante. — **Conservación de la energía:** Principio de equivalencia; primer principio de la termodinámica. Método de Joule para determinar J. Principio de los estados inicial y final. Principio de la conservación de la energía. Expansión y trabajo de los gases. Experiencias de Gay-Lussac y de Joule. Relación de Mayer

Formas de la energía

Definición de la energía. — Se dice que un sistema de cuerpos posee energía cuando es capaz de realizar un trabajo mecánico. La energía del sistema es, por definición, igual al trabajo que puede realizar. Energía y trabajo son, pues, magnitudes de la misma naturaleza, que se definen por medio de las mismas unidades: kilográmetro, ergio, joule, etc. Estas unidades están ligadas por las relaciones

$$1 \text{ kilográmetro} = 9{,}81 \text{ joules}$$
$$1 \text{ joule} = 10^7 \text{ ergios.}$$

Energía mecánica. — Se denomina energía *mecánica* la proporcionada por un sistema mecánico. Por ejemplo, un peso que puede descender desde cierta altura, un muelle tenso, un gas comprimido por un pistón fijo, son fuentes de energía mecánica. Esta energía podrá aprovecharse mientras el peso se mantenga a una altura determinada, el muelle permanezca tenso, etc.; puede, pues, conservarse dicha energía o aprovecharse inmediatamente, por lo cual se denomina *energía potencial.*

Para elevar el peso P a la altura H, ha sido necesario realizar un trabajo P × H, trabajo que se recuperará cuando el peso vuelva a su posición inicial.

Lo mismo sucederá con un depósito lleno situado a determinada altura, que podrá utilizarse como salto de agua capaz de accionar una turbina.

En el caso de los saltos de agua naturales, el agua se ha condensado en las montañas y después cae por su propio peso. La energía acumulada en un lugar montañoso procede entonces de la diferencia entre la energía absorbida para que el agua pase del estado de vapor al nivel del mar, por ejemplo, y la restituida al condensarse a una altura mayor, es decir, a una presión menor o a una temperatura más baja. Cualquiera que sea la forma de energía empleada para producir la elevación de este agua, se convierte en una fuente de energía mecánica si se la utiliza para accionar una turbina.

Consideremos ahora dos planos OA y OB, inclinados en sentidos contrarios (*fig.* 167) y dejemos caer a lo largo del primero de estos planos un cuerpo pesado, que se abandona en A sin velocidad inicial. El cuerpo descenderá a lo largo del plano AO, y llegará al punto O con cierta velocidad, ascendiendo después por el plano OB hasta alcanzar cierta altura; en el momento en que está en O, este cuerpo posee cierta energía que le permite realizar un trabajo: el del recorrido ascendente, puesto que eleva su propio peso. Esta energía se denomina *energía cinética*, porque es debida al movimiento del cuerpo y desaparece al cesar el movimiento. Contrariamente a la energía potencial, no puede conservarse, sino que debe utilizarse inmediatamente. Para recordar esta característica esencial se la denomina también *energía actual.*

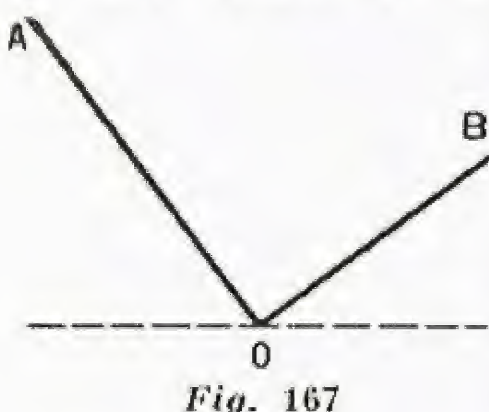


Fig. 167

Esta energía cinética es igual, por definición, al trabajo que el cuerpo es capaz de realizar contra las fuerzas que se le aplican mientras asciende por el plano inclinado OB. Según el teorema de las fuerzas (v. p. 243, vol. V), este trabajo se opone a la variación de la fuerza viva del cuerpo desde el momento en que pasa por O hasta el momento en que se detiene en el plano OB. Pero, en este momento, su velocidad es nula, así como su fuerza viva. Resulta entonces que la energía cinética del cuerpo en el punto O es igual a su fuerza viva en ese momento:

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2,$$

donde m es la masa del cuerpo y v su velocidad en el punto O.

Este resultado es, evidentemente, general, y la energía cinética de un sistema de puntos materiales en movimiento es igual a su fuerza viva total:

$$E_c = \Sigma \frac{1}{2} mv^2,$$

siendo m la masa de una cualquiera de las partículas materiales que constituyen el sistema y v su velocidad en el instante considerado.

Todo cuerpo animado de un movimiento de cualquier género en el campo gravitatorio posee en todo momento cierta energía potencial E_p, debida a su altura con respecto a la Tierra, y una energía cinética E_c, debida a su velocidad; ambas energías pueden variar en el transcurso del movimiento, denominándose *energía mecánica total* a la suma

$$E = E_p + E_c.$$

La energía acumulada en el volante de una máquina en movimiento es una energía cinética y se calcula como ya se ha dicho. En el caso del proyectil que se lanza con cierta inclinación sobre la horizontal y que gira sobre sí mismo, su energía mecánica en cada momento consta de tres términos: 1°, la fuerza viva debida a su masa, dependiente del cuadrado de la velocidad de su centro de gravedad; 2°, la energía adquirida al girar sobre su eje, análoga a la de un volante de máquina, y 3°, la energía potencial debida a su altura en el instante considerado.

Conservación de la energía mecánica. — Se deduce de lo anterior que los dos tipos de energía mecánica de un sistema pueden variar durante sus transformaciones.

Consideremos un cuerpo a una altura h sobre el suelo, cuya masa sea m: su peso será

$$P = mg$$

(siendo g la aceleración de la gravedad) y su energía potencial:

$$E_p = mgh.$$

Este cuerpo, al caer, efectuará un trabajo igual a mgh.

Analicemos la caída del cuerpo: cuando llega al punto M (*fig.* 168), el cuerpo, que en A tenía una velocidad nula, ha adquirido una energía cinética, debida a su velocidad v, energía cinética que será

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2;$$

pero en ese instante, ha descendido desde la altura h inicial a la altura $(h - x)$ menor, y su energía potencial sólo será, por consiguiente,

$$E'_p = mg\,(h - x).$$

Como, en virtud de la ley de caída de los cuerpos, se tiene

$$v = \sqrt{2gx} \quad \text{o} \quad v^2 = 2gx,$$



Fig. 168

el valor de la energía cinética será

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot 2gx = mgx.$$

Es evidente que la energía cinética adquirida por el peso (mgx) es igual a la energía potencial perdida:

$$mgx = mgh - mg\,(h - x),$$

y la energía mecánica total del sistema es constante hasta el momento en que el peso A llega al suelo, momento en que su energía potencial es nula y su energía cinética máxima.

En cada instante de la caída se tiene, pues, un valor constante de la energía mecánica total E, aumentando E_c al mismo tiempo que E_p disminuye, durante la caída.

Consideremos otro ejemplo: el péndulo. Sea el péndulo OA (*fig.* 169), compuesto de un esfera de peso P. Cuando se separa el péndulo desde su posición OC de equilibrio para llevarla a A, el peso P se eleva cierta altura h y, por consiguiente, se le suministra una energía potencial suplemetaria $Ph = mgh$.

Si se abandona el péndulo a su propio peso, oscilará, pasando por el punto C situado sobre la vertical, en cuyo momento su energía potencial es mínima, como es sabido, por ser el punto más bajo en su recorrido desde su punto de partida; pero al pasar por este punto adquiere una velocidad que le permite ascender hasta el punto B, situado a la misma altura h que el punto A. La energía cinética adquirida en el punto B era igual, pues, a la que habría sido necesaria para suministrar a la esfera la energía potencial Ph inicial por cualquier otro medio.

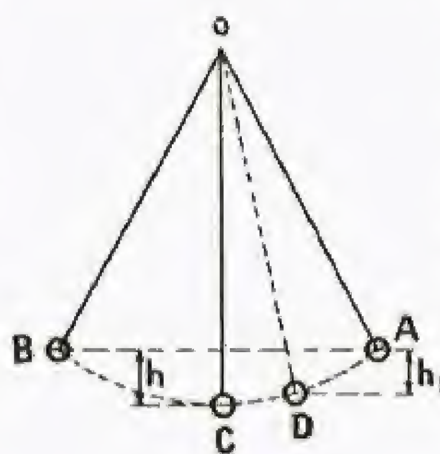


Fig. 169

Existe, pues, igualdad entre la energía potencial en el punto A, en que la energía cinética es nula, y la energía cinética en el punto B, en que la energía potencial es, a su vez, nula. Ambas energías varían, por consiguiente, en sentido inverso, y su suma permanece constante en el transcurso de cada oscilación.

Este hecho, de carácter general, se denomina *conservación de la energía mecánica;* se le enuncia así:

En todo sistema aislado, es decir, sobre el que no actúen fuerzas exteriores, la suma de la energía potencial y de la energía cinética permanece constante.

Por regla general, siempre se produce un trabajo exterior, aunque

sólo sea el debido a los diversos frotamientos. Puede también existir cierto trabajo utilizado. Sea W el trabajo total del sistema; este trabajo se manifestará por una reducción de la energía potencial y de la energía cinética del sistema, y podrá escribirse

$$W = \triangle E_p + \triangle E_c;$$

sólo en el caso en que se supone $W = 0$ se tendrá la relación

$$\triangle E_p + \triangle E_c = 0,$$

o

$$E_p + E_c = \text{constante},$$

que es la expresión de la conservación de la energía mecánica.

Energía calorífica. — La suma de la energía potencial y de la energía cinética de un sistema puede, como acaba de verse, no permanecer constante.

De una manera general, la energía mecánica total de un sistema disminuye con el frotamiento y los choques. Si, por ejemplo, se frena un cuerpo durante su caída por un plano inclinado, de forma que su velocidad permanezca constante, se producirá una disminución de su energía potencial sin que aumente simultáneamente su energía cinética. En todos los fenómenos de esta naturaleza se produce calor; así, por ejemplo, el fósforo de las cerillas se inflama por frotamiento; las herramientas se calientan al trabajar los metales, etc. Si se dispara una bala de plomo contra una placa de acero, puede alcanzar, en el momento del choque, una temperatura superior a su punto de fusión: el calor debe, pues, considerarse como una forma de energía. Esta hipótesis la confirma el hecho de que es posible, inversamente, producir trabajo mecánico consumiendo calor, por ejemplo, en las máquinas de vapor.

Otras formas de energía: eléctrica, química, radiante. — La corriente eléctrica es uno de los numerosos fenómenos que pueden producir trabajo mecánico o calor. La primera transformación en el trabajo mecánico la realizan los motores, y la transformación inversa los generadores electromagnéticos de corriente (dinamos, alternadores). En todos los conductores por los que pasa una corriente se produce calor, fenómeno conocido como efecto Joule; la transformación contraria directa, de calor en electricidad, puede observarse en las pilas termoeléctricas, y basta calentar una de las dos soldaduras de dos metales diferentes que forman parte de un circuito para que nazca, en dicho circuito, una corriente. Se deduce, pues, que existe *energía eléctrica*, y que el paso de una corriente no es más que un transporte de energía a lo largo de un circuito.

Un condensador cargado suministra también energía eléctrica, puesto que al descargarse es capaz de proporcionar una corriente, pero esta energía es energía potencial.

También se ha visto anteriormente (calorimetría) que las reacciones químicas se producen con absorción o desprendimiento de calor, según los casos. La combustión, que no es más que la combinación del oxígeno del aire con el cuerpo combustible o con los elementos que lo integran, revela que una mezcla de carbón y oxígeno contiene una *energía química* potencial que puede utilizarse iniciando la combustión o la combinación de ambos cuerpos.

La energía química se utiliza también en las pilas y acumuladores eléctricos, que la transforman en energía eléctrica; en la electrólisis se produce el fenómeno inverso, en particular al cargar los acumuladores.

Las explosiones son un ejemplo de transformación de energía química en trabajo mecánico.

La luz se produce en diversas circunstancias, siendo la más frecuente la de los cuerpos calentados a una temperatura suficientemente elevada (lámpara de gas, lámpara eléctrica de incandescencia). La incandescencia es precisamente la transformación de energía calorífica en *energía radiante*.

En los fenómenos de luminiscencia, o emisión de luz en frío, interviene otra forma de energía; en la triboluminiscencia, es la energía mecánica. Por ejemplo, la ruptura de ciertos cristales provoca la aparición de luz, como cuando se aplasta azúcar en la obscuridad. En la electroluminiscencia, la energía eléctrica se transforma directamente en luz sin pasar por la forma calorífica intermedia; este fenómeno se produce en los tubos de gas rarificado (neón, vapor de sodio o de mercurio). En la quimioluminiscencia, puede observarse cómo ciertas reacciones químicas emiten luz sin calentamiento apreciable; así sucede con la oxidación lenta del fósforo blanco en contacto con el aire. La luz emitida por las luciérnagas se debe a un fenómeno análogo: procede de las reacciones químicas que se producen durante la digestión.

La energía radiante puede convertirse en una cualquiera de las otras cuatro formas de energía que se han considerado. Cuando una substancia absorbe radiaciones, se calienta, efecto calorífico que es particularmente intenso en el caso de las radiaciones infrarrojas.

Por otra parte, los haces luminosos ejercen en los cuerpos sobre los cuales se dirigen una fuerza de empuje que produce efectos mecánicos: es la denominada *presión de radiación*. Este fenómeno explica la repulsión de la cola de los cometas por los rayos solares. La transformación de energía luminosa en energía eléctrica se produce en la fotoelectricidad: ciertos metales emiten electrones al recibir la luz, y al captar estos electrones puede obtenerse una corriente eléctrica. Este fenómeno ha sido objeto de numerosas aplicaciones prácticas, entre ellas, el cine sonoro y la televisión.

Son numerosas las modificaciones químicas de los cuerpos que se producen bajo la influencia de la luz, y su estudio constituye la parte de la ciencia denominada *fotoquímica*, transformación de la energía luminosa en energía química. Las plantas realizan esta transformación, al absorber su clorofila las radiaciones solares; la energía así almacenada se emplea para sintetizar los alimentos hidrocarbonados.

Conservación de la energía

Principio de equivalencia; primer principio de la termodinámica. — Dada la posibilidad de transformar el trabajo mecánico en calor y el calor en trabajo mecánico, se plantea la siguiente cuestión: ¿existe una relación entre la cantidad de calor producida y la energía mecánica cedida por el sistema?

El *principio de equivalencia* entre el calor y el trabajo mecánico es la respuesta que da la experiencia a esta cuestión. Dicho principio es el siguiente:

En todo sistema material que realiza un ciclo, es decir, que parte de un estado inicial dado y vuelve al mismo estado, cambiando con el medio exterior trabajo mecánico y calor exclusivamente,

1° *Si absorbe calor, realiza un trabajo;*

2° *Si desprende calor, se le ha suministrado trabajo;*

3° *En todos los casos, la equivalencia que existe entre el trabajo realizado* W *y la cantidad de calor* Q *se expresa por la relación constante:*

$$\frac{W}{Q} = J = \text{constante}.$$

Esta relación constante J se denomina *equivalente mecánico de la unidad de cantidad de calor*.

Conviene insistir en el punto importante de que el sistema tiene que haber realizado un ciclo completo de intercambios, y volver a su estado inicial sin que se hayan producido más transformaciones energéticas que las de calor en trabajo mecánico, o recíprocamente. Por lo tanto, si el sistema ha sufrido modificaciones químicas en su estado final, por ejemplo, no debe considerarse que ha vuelto al estado inicial y no es aplicable el principio de equivalencia.

El equivalente mecánico del calor se ha determinado de muchas formas diferentes, de ejecución más o menos sencilla, como los frotamientos de paletas contra un líquido (agua o mercurio), el frotamiento de dos sólidos, el aplastamiento de una masa de plomo por un choque, la transformación de trabajo en energía eléctrica empleada, a su vez, después de transformada en calor, en calentar el agua de un calorímetro, la producción de un trabajo con una cantidad de calor determinada por medio de una máquina térmica, etc.

Método de Joule para determinar J. — En este método se transforma directamente un trabajo mecánico en calor mediante frotamiento del agua sobre un sistema de paletas giratorias que la agitan. El aparato que se emplea para esta medida se compone de un depósito cilíndrico C lleno de agua (*fig.* 170) que hace de calorímetro, en cuyo eje un tambor T, accionado por dos pesos P_1 y P_2, que descienden simultáneamente, agita fuertemente el líquido de C al girar por medio de un sistema de paletas, unas fijas y otras móviles. Las alturas de caída de los pesos P_1 y P_2 se miden mediante escalas verticales.

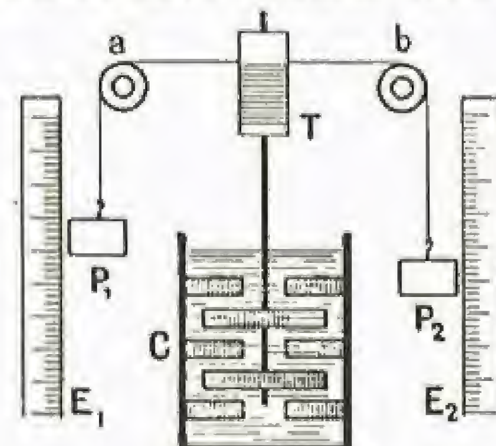


Fig. 170

Los pesos P_1 y P_2 se desplazan en la experiencia desde una altura inicial a otra final, cuya diferencia es h; el trabajo que efectúan será $(P_1 + P_2)h$, y si se repite la experiencia n veces a fin de que aumente el trabajo, se tendrá

$$W = n(P_1 + P_2)h.$$

La cantidad de calor que se desprende en el calorímetro por agitación del agua, es decir, por sus frotamientos sobre sí misma y sobre las paletas y las paredes del calorímetro, se indicará por la diferencia entre la temperatura inicial t_1 y la final t_2, en función de la capacidad calorífica M de la parte calentada:

$$Q = M\,(t_2 - t_1).$$

Para aplicar el principio de equivalencia al calorímetro se razona de la siguiente manera: supongamos que el calorímetro se deja enfriar hasta que recupera la temperatura inicial t_1; entonces cederá al medio exterior la cantidad de calor Q, producida por los frotamientos. En la transformación total sólo ha cambiado con el medio exterior calor y trabajo, es decir, ha recibido el trabajo W y desprendido la cantidad de calor Q, y ha vuelto a su estado inicial. Por consiguiente, podrá escribirse

$$J = \frac{W}{Q} = \frac{n\,(P_1 + P_2)h}{M\,(t_2 - t_1)}.$$

Para la exactitud del cálculo habrá que tener en cuenta diversas correcciones indispensables:

1° Como los pesos P_1 y P_2 tienen al final de su recorrido una velocidad v no nula, conservan al final de la experiencia una energía cinética.

$\frac{1}{2} \cdot \frac{P_1 + P_2}{g} v^2$ que habrá que sustraer del trabajo mecánico proporcionado al calorímetro. La experiencia debe ser concebida de forma que esta corrección sea poco importante;

2º Existen pérdidas de frotamiento en las cuerdas arrolladas al tambor, en el eje de dicho tambor que gira sobre sus ruedas y en los cojinetes *a* y *b*. Estas pérdidas, que deben ser pequeñas, se determinan mediante experiencias en vacío.

En estas condiciones, el valor hallado para J es $4{,}185 \times 10^7$ ergios por caloría. Según la unidad de trabajo que se emplee para el valor de la caloría se tendrá

$$J = 4{,}185 \times 10^7 \text{ ergios} = 4{,}185 \text{ joules},$$

o, para la kilocaloría,

$$J = \frac{4{,}185}{981} = 427 \text{ kilográmetros}.$$

Todos los métodos de transformación de energía, incluso los más diferentes, conducen al mismo resultado.

Transformando una corriente eléctrica en calor mediante el paso de una corriente de intensidad I por una resistencia R situada en un calorímetro, se desprende una cantidad de calor Q que se mide de la forma habitual y que corresponde al trabajo de la corriente eléctrica, que, como se sabe, es igual a RI^2t.

El cociente: $\frac{RI^2t}{Q} = J = 4{,}185$ joules por caloría.

Se deduce de este resultado que la transformación de un trabajo en calor, sea mecánico o eléctrico, expresado en ergios, en joules o en kilográmetros, da el mismo número de calorías, cualquiera que sea la forma inicial que revista la energía que se le suministre.

Principio de los estados inicial y final. — Cuando un sistema recibe del medio exterior la cantidad de calor Q y realiza el trabajo mecánico W, sin ningún otro cambio de energía, hemos visto que la cantidad JQ — W es nula, si vuelve a su estado inicial. Si la transformación sufrida lo lleva a un estado final diferente del estado inicial, esta cantidad, denominada *variación de energía interna*, no es, en general, nula. Se demuestra, no obstante, como corolario del principio de equivalencia, que sólo depende de los estados inicial y final y no de la transformación sufrida. Tal es el enunciado del *principio de los estados inicial y final*, del que se verá un caso particular en química (v. TERMOQUÍMICA, págs. 255 y 256).

Principio de la conservación de la energía. — La experiencia ha permitido demostrar sucesivamente:

1º Que todas las formas de energía mecánica son equivalentes y que en un sistema en el que, por sus transformaciones, sólo se producen formas diversas de energía mecánica, la energía total se mantiene constante, es decir, se conserva la energía mecánica;

2º Que la energía mecánica transformada en calor da una cantidad equivalente de este último, cualquiera que sea la forma en que se efectúe la transformación;

3º Que la energía eléctrica, que se expresa en unidades mecánicas, proporciona también una cantidad de calor equivalente al trabajo mecánico correspondiente.

El estudio cuantitativo de los casos más variados ha conducido a comprobar que siempre que una energía se manifiesta en cierta forma, desaparece, en la misma cantidad, bajo una o varias otras formas. Puede entonces enunciarse el siguiente principio general:

La energía total de un sistema aislado permanece constante (principio de la conservación de la energía).

Por sistema aislado debe entenderse un conjunto limitado que no puede ceder ni recibir energía del medio exterior.

Este enunciado equivale a decir que no puede crearse energía por ningún medio ni hacer que desaparezca la energía existente. Sólo puede alterarse su forma, pero la cantidad total permanece invariable.

El principio de la conservación de la energía debe a Mayer su expresión actual, y ha sido precisado después por los trabajos de Joule y de Helmholtz. Su gran importancia se debe a que los descubrimientos modernos de la física no sólo no lo han modificado, sino que han confirmado todas sus consecuencias. No ocurre lo mismo con el principio de la conservación de la materia, que se consideró como análogo durante mucho tiempo, y cuya demostración experimental en el campo de la química, anterior a la radiactividad, no había encontrado nunca excepciones.

Se admite actualmente que la masa de un cuerpo es susceptible de disminución si proporciona energía. Esta masa podrá asimilarse a una energía potencial capaz de transformarse, bajo ciertas influencias, en energía cinética o actual. Debe considerarse que toda aportación de energía a un cuerpo, elevando su temperatura, por ejemplo, aumenta su masa de una cantidad que puede calcularse, pero que en la práctica corriente es de un orden de magnitud demasiado pequeña para que haya que tenerla en cuenta.

Expansión y trabajo de los gases. — Cuando un gas se comprime, se calienta. La experiencia del mechero de aire es un ejemplo bien conocido. El mechero de aire consta de un tubo de vidrio resistente A (*fig.* 172), cerrado por su parte inferior, en el que puede desplazarse un émbolo P. Cuando el émbolo se hunde bruscamente, la compresión del aire lo calienta hasta el punto que puede bastar para encender un trozo de yesca colocado en el fondo.

La expansión de un gas, fenómeno inverso a la compresión, es susceptible de proporcionar trabajo mecánico exterior igual al realizado durante la compresión. Cabe, pues, durante la expansión de un gas comprimido, la posibilidad de que produzca un trabajo mecánico y la consiguiente producción de enfriamiento del gas, tanto mayor cuanto mayor es el propio trabajo producido.



Fig. 171

Experiencias de Gay-Lussac y de Joule. — Gay-Lussac se propuso demostrar que la totalidad del enfriamiento producido por la expansión de un gas era debida al trabajo mecánico realizado, y que cuando este último era nulo no se producía calentamiento. Esta conclusión fue verificada por la experiencia, y después la realizó de nuevo Joule, en la forma siguiente:

Un calorímetro C, de forma especial (*fig.* 172) y lleno de agua, contiene dos vasos A y B unidos por un tubo colocado en la parte inferior y provisto de una llave de paso R. Al principio de la experiencia se ha llenado el vaso A de aire comprimido a 20 kilogramos por centímetro cuadrado, y en el vaso B se ha hecho el vacío. Si se abre la llave de paso R, el aire del depósito A se expande, y en el equilibrio, el volumen de aire se duplica, y la presión desciende a casi la mitad de su valor, o sea a 10 kilogramos por centímetro cuadrado.

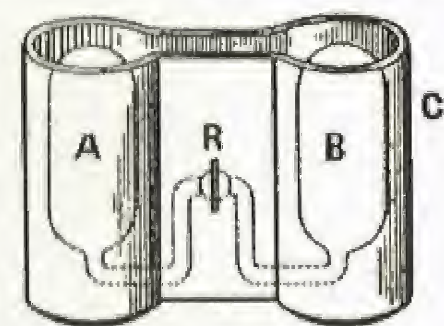


Fig. 172

Se comprueba entonces que la temperatura del calorímetro C no ha variado, de donde se obtiene la conclusión de que la expansión de los gases sin trabajo exterior, es decir, por la expansión en el vacío, se produce, en primera aproximación, sin que se observen variaciones de temperatura.

En realidad, se sabe que esta conclusión no es completamente rigurosa y que se produce un ligero enfriamiento en el caso del aire y de otros muchos gases, puesto que puede llegarse, mediante el dispositivo de Linde (v. pág. 48), a disminuir, por simple expansión del aire, su temperatura hasta su valor de licuefacción.

De las experiencias de Gay-Laussac y de Joule se deduce que la energía interna de un gas no depende de su presión, sino de su temperatura, y que, a temperatura constante, su energía es también constante. Cuando la expansión de un gas se realiza con producción de trabajo, el principio de la conservación de la energía exige que al realizar un trabajo W el gas proporcione una cantidad de calor equivalente Q, tal que

$$W = JQ.$$

Relación de Mayer. — Sea un depósito cilíndrico cerrado por todas sus partes y en cuyo interior puede desplazarse un émbolo de peso P, y de un centímetro cuadrado de sección. La altura del cilindro es tal que el volumen libre bajo el émbolo, en la mitad de su recorrido, contiene un gramo de gas perfecto a 0º C. Encima del émbolo se ha hecho el vacío.

Los gases perfectos duplican su volumen cuando pasan de 0º C a 273º C, puesto que

$$v = v_0 \left(1 + \frac{t}{273}\right) \qquad \text{para} \quad t = 273,\ v = v_0;$$

si el gas situado debajo del émbolo alcanza la temperatura de 273º C, el émbolo ascenderá a la parte superior de su recorrido y el volumen comprendido debajo del mismo se duplicará. El peso P del émbolo, cuya sección es un centímetro cuadrado, ejercerá presión sobre el gas.

Imaginemos ahora las siguientes modificaciones en el sistema. En el primer estado *a* (*fig.* 173), 1 gramo de gas ocupa $2v_0$ a 273º C bajo la presión p_0 ejercida por el peso del émbolo P. Si se enfría el gas a 0º C, su volumen, bajo la misma presión p_0, se reducirá a v_0 (*b*). Si C es el calor específico del gas a presión constante, el gas cede al medio exterior una cantidad de calor igual a Ct = 273 C. La variación interna del sistema E_1 será

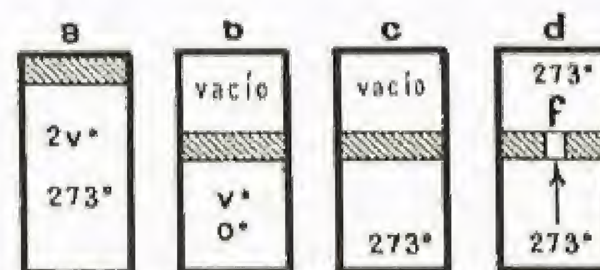


Fig. 173

$$E_1 = p_0v_0 - 273 \text{ CJ}.$$

En el tercer estado *c*, el émbolo se inmoviliza en la posición que tenía en *b* y la temperatura, bajo el volumen constante b_0, asciende a 273º C. El calor que hay que proporcionar al gas será igual a ct = 273 *c*, y la energía absorbida por el gas, E_2, será:

$$E_2 = 273 \text{ cJ}.$$

Por último, en el estado *d*, se hace una abertura *f* en el émbolo para que el gas se dilate en todo el volumen del cilindro. Su volumen es entonces $2v_0$, y su temperatura permanece a 273º C, puesto que la expansión se produce sin trabajo exterior. Se tendrá, pues,

$$E_3 = 0.$$

En d se ha vuelto al estado inicial a en que el gas ocupaba el volumen $2v_0$, a 273° C. Por consiguiente, habrá efectuado un ciclo completo y no habrá habido variación de energía interna.

La energía E_1 cedida por el gas y la E_2 que se le ha proporcionado, eran iguales:

$$E_1 = E_2,$$

o bien:

$$p_0v_0 - 273\ CJ = 273\ cJ,$$

que también puede escribirse

$$273\ J\ (C - c) = p_0v_0.$$

Introduciendo la constante molecular R de los gases perfectos y la masa molecular M del gas, se tendrá

$$R = \frac{p_0v_0}{273},$$

siendo el volumen molecular $V_0 = Mv_0$, y entonces la relación se convierte en

$$M\ (C - c) = \frac{R}{J} = 2.$$

Esta relación, ya citada anteriormente (v. p. 404), fue establecida, mediante el razonamiento anterior, por el alemán R. Von Mayer, y le sirvió para calcular el valor del equivalente mecánico de la caloría antes de cualquier determinación experimental.

Motores térmicos

Reseña histórica. Motores de vapor. Motores de combustión interna. Turbinas de vapor y de gas. Medida de la potencia de los motores térmicos. — **Principio de Carnot:** Segundo principio de termodinámica. Ciclo de Carnot. Degradación de la energía

Reseña histórica. — **Rivaut** demostró, en 1605, que una bomba llena de agua sometida a un fuego intenso acaba por estallar. **Salomón de Caus** (1575-1626 aproximadamente) utilizó esta presión para hacer ascender el agua, en 1615. **Papin** construyó un digestor, en 1674, y después, desde 1687, se dedicó a hacer ascender un émbolo en el interior de un cilindro por la fuerza del vapor y a que descendiera nuevamente condensando el vapor que había producido la absorción. En 1698, **Savery** (1650-1716 aproximadamente) perfeccionó la máquina de Papin, produciendo vapor en un vaso especial. A partir de este momento, se sucedieron los perfeccionamientos, especialmente gracias a **Watt; Carnot** escribió, en 1824, a propósito de la importancia de las máquinas térmicas, sus *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y de las máquinas propias para desarrollar esta potencia*, de las cuales se deduce el principio de Carnot.

Motores de vapor. — Desde el punto de vista físico, una máquina de vapor puede considerarse compuesta por dos órganos distintos: *la caldera*, en la que se produce vapor a presión, y el *motor* propiamente dicho, que es el órgano mecánico en el que se expande el vapor para proporcionar un trabajo. Después de su expansión, el vapor sale al exterior y se condensa; a fin de no perder el calor liberado durante la condensación del agua, se evita por lo general el *escape libre* de este vapor y se emplea un *condensador*, que es el tercer órgano necesario para obtener una transformación económica del calor en trabajo mecánico (v. págs. 191, 192 y 195).

Caldera. — Las calderas son de tipos industriales bastante variados, que pueden reducirse a tres:

1° Calderas con hervidores;

2° Calderas tubulares de llama;

3° Calderas tubulares de agua.

Como muestra esquemáticamente la figura 174, las calderas de hervidores constan por lo general de un primer cuerpo cilíndrico A, de chapa de hierro, unido a dos cuerpos cilíndricos llamados *hervidores* B y C, de menor diámetro, que sufren el contacto directo de las llamas, obligadas a desplazarse horizontalmente en el sentido de la longitud de los hervidores por una pantalla E de material refractario; las llamas vuelven después en sentido inverso por encima de dicha pantalla bordeando el cuerpo cilíndrico A y saliendo por la chimenea. En la parte superior del cuerpo A se encuentra la *cúpula* D en la que se hace la toma de vapor y se colocan los aparatos de medida y de seguridad: manómetro y válvula.

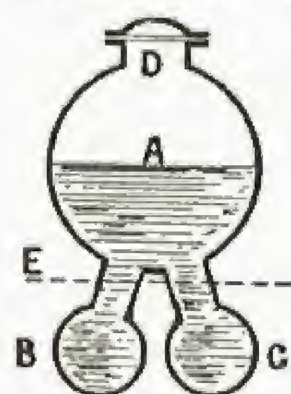


Fig. 174

Las calderas de tubos, que son atravesadas por las llamas (*fig.* 175), constan de un gran cuerpo cilíndrico A al que se han fijado numerosos tubos T, T, T, que dan al exterior por las dos caras extremas del cuerpo cilíndrico. El hogar F está colocado en uno de los extremos y las llamas pasan por el interior de los tubos y salen por el otro extremo hacia la chimenea. El agua se encuentra en el exterior de los tubos, dentro del cuerpo tubular A, recogiéndose el vapor por la cúpula D.

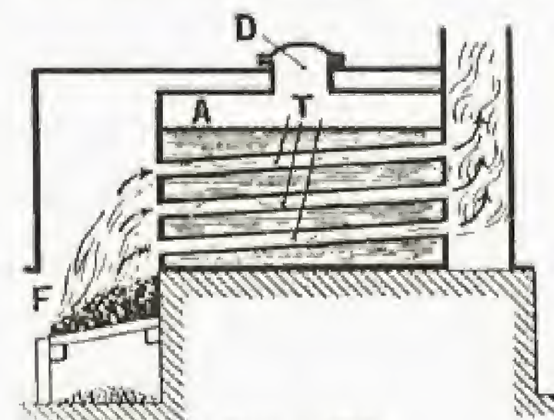


Fig. 175

El cuerpo tubular puede constituirse de tal forma que los tubos sirvan para unir los cuerpos cilíndricos que contienen el agua que circula por los tubos. Los tubos están entonces sometidos directamente a las llamas, circulando por ellos una corriente de agua y de vapor, gracias a la forma que se les ha dado para favorecer esta circulación.

En los capítulos especiales que se dedicarán particularmente a estos órganos importantes de producción de vapor se darán los detalles de los mismos; lo que importa saber ahora es que estos aparatos, en los que se queman combustibles como carbón, coque o mazut, permiten obtener de una manera continua vapor de agua a presión, a la temperatura de ebullición del agua bajo esta presión, es decir, a los valores siguientes:

151° C	para	una	presión	de	5	kg/cm²
179° C	»	»	»	»	10	»
197° C	»	»	»	»	15	»
211° C	»	»	»	»	20	»

si no existe *sobrecalentamiento* del vapor, es decir, si el vapor permanece saturante. A veces, un dispositivo especial denominado *sobrecalentador* permite que el vapor producido reciba un calentamiento suplementario de los hervidores, lo que ofrece la ventaja de reducir la condensación en el conjunto de tubos que llevan el vapor al motor.

Motor alterno. — Los motores de vapor se componen, en principio, de un cilindro A (*fig.* 176) en cuyo interior se desplaza un émbolo P. El vapor es admitido bajo el émbolo a una presión p_1, estando sometida la otra cara del émbolo a una presión más baja p_2. El esfuerzo ejercido sobre el émbolo F será:

$$F = S\ (p_1 - p_2).$$

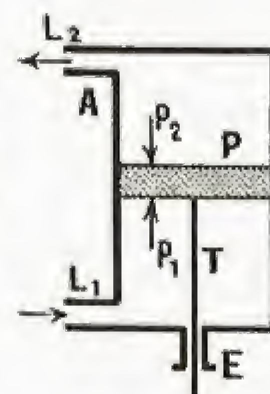


Fig. 176

Cuando la cantidad de vapor que penetra por la lumbrera L_1 es bastante grande, se cierra esta lumbrera, pero el émbolo continúa ascendiendo por estar aún accionado por la presión que ejerce el vapor al dilatarse hasta alcanzar la presión p_2. En este momento, los esfuerzos ejercidos sobre ambas caras del émbolo se equilibran, y el émbolo alcanza el final de su trayectoria. En la máquina de doble efecto, una disposición mecánica abre entonces la lumbrera L_1 a la presión p_2 de escape, y la lumbrera L_2 a la introducción del vapor a la presión p_1. El movimiento inverso del émbolo se produce de arriba abajo en las mismas condiciones anteriores, y así sucesivamente.

El émbolo arrastra en su recorrido la varilla T a la que está fijado; esta varilla sale del cilindro por un prensaestopas E y transmite las fuerzas que desplazan el émbolo a un mecanismo que transforma el movimiento rectilíneo alternativo en movimiento continuo de rotación. La parte puramente mecánica se estudiará con detalle más adelante (v. página 192). Baste por el momento saber que la abertura de las lumbreras de admisión y de escape se produce automáticamente por el propio movimientos del motor, en posiciones determinadas del émbolo durante su recorrido longitudinal.

Supongamos primeramente que el émbolo se encuentra en la parte más baja de su recorrido: la lumbrera L_1 estará cerrada y la lumbrera L_2 abierta. Las fases son entonces las siguientes:

1° Admisión directa del vapor (L_1 abierto al vapor, a la presión p_1; L_2 abierto al escape, a la presión p_2);

2° Expansión del vapor (L_1 cerrado; L_2 abierto al escape); el émbolo continúa ascendiendo hasta la parte superior de su recorrido;

3° Admisión inversa del vapor (L_1 abierto al escape; L_2 abierto al vapor, a la presión p_1);

4° Expansión del vapor (L_1 abierto al escape; L_2 cerrado). El émbolo desciende hasta el fondo de su recorrido, y se vuelve al punto inicial, reproduciéndose los mismos movimientos.

El esfuerzo ejercido sobre el émbolo por la presión del vapor es máximo durante el período de admisión, siendo entonces la diferencia de presión ($p_1 - p_2$); durante la expansión, esta diferencia va disminuyendo, pasando p_1 desde su valor inicial, es decir, la presión proporcionada por la caldera, hasta el valor p_2 del escape, que se obtiene al final del recorrido.

Condensador. — Se deduce que para una presión dada p_1 del vapor a su salida de la caldera, la fuerza que se ejerce sobre el émbolo es tanto mayor cuanto menor es el valor de p_2. Por otra parte, la cantidad de calor del vapor de escape se perderá si se escapa libremente a la atmósfera. Interesa, pues, para disminuir la cantidad de calor que hay que proporcionar al motor para un trabajo determinado, recuperar la mayor parte del calor del vapor de escape.

Esta cantidad de calor consta de dos términos: el calor de vaporización del agua, que puede obtenerse de nuevo por condensación, y el calor necesario para elevar su temperatura desde su valor inicial al de vaporización. Estas dos cantidades de calor se emplean en un condensador, ya para calentar el agua de alimentación de la caldera, ya, todavía mejor, utilizando la misma agua después de la condensación y efectuando esta condensación a una presión bastante baja para que se produzca hacia 45° C, o sea 1/10 de atmósfera, aproximadamente.

Los aparatos condensadores son de formas muy variadas, que no se describirán en este momento. El agua condensada es recogida en todos los casos por una bomba que la introduce nuevamente en la caldera.

Después de esta operación, cada kilogramo de agua utilizada en el funcionamiento del motor ha realizado lo que se denomina un ciclo completo, si se parte del agua a una temperatura T_1; la caldera la calienta y la transforma en vapor a la presión p_1 y a la temperatura T_2. Se dilata en el motor a una presión p_2 y a una temperatura T_3, siendo dirigida finalmente por el condensador en el estado líquido a la temperatura inicial T_1 y a la presión p_2 antes de entrar de nuevo en la caldera para efectuar un segundo ciclo.

Motores de combustión interna. — Estos motores, denominados también "motores de explosión", utilizan combustibles particulares capaces de proporcionar, al mezclarse con el aire, gases fácilmente inflamables desde el momento que alcanzan en un punto de su masa una temperatura suficientemente elevada. Los cuerpos que mejor se prestan a esta aplicación son: el gas del alumbrado, el gas pobre, las esencias minerales volátiles, el alcohol, la bencina, etc.; también se han empleado líquidos menos volátiles, pulverizados, e incluso polvos finos de carbón en suspensión en el aire.

Estos motores ofrecen el interés de ser relativamente ligeros para una potencia dada; como la combustión se hace dentro del propio cilindro del motor y los gases de escape se vierten directamente al exterior, evitan la necesidad de una caldera y de un condensador, como en los motores de vapor.

El funcionamiento o ciclo de los motores de combustión interna difiere bastante, por este hecho, del de los aparatos de vapor. Mientras que el motor de vapor funciona en dos tiempos, es decir, que se obtiene sobre cada cara del émbolo el ciclo completo en la subida y en el descenso del émbolo, en el motor de explosión de tipo más clásico se requieren cuatro tiempos. Estos tiempos son los siguientes:

1° Aspiración de la mezcla combustible;

2° Compresión de esta mezcla;

3° Combustión y expansión de los gases;

4° Expulsión al exterior de los gases quemados.

Además, la alta temperatura alcanzada durante la combustión no permite que el émbolo trabaje sobre las dos caras, a causa del calentamiento exagerado que alcanzarían los órganos de transmisión de la fuerza.

El motor de combustión interna se compone esquemáticamente de un cilindro A en cuyo interior se desplaza un émbolo P (*fig.* 177). El recorrido del cilindro está limitado en su parte superior, en la que queda un espacio libre denominado cámara de combustión C. La parte superior del cilindro es además de envoltura doble y permite, mediante una circulación de agua, que las paredes se mantengan a una temperatura bastante reducida a fin de que no se destruya el aceite del engrase.

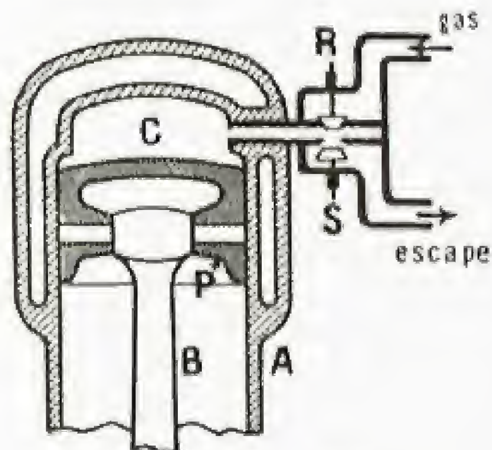


Fig. 177

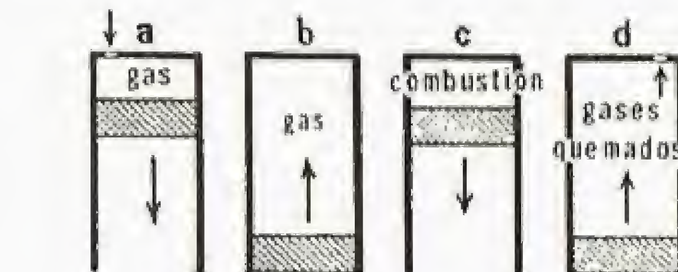


Fig. 178

La cámara de combustión lleva una abertura lateral que sirve para que penetre el gas combustible cuando se abre la válvula R, y para la expulsión del gas quemado, cuando se abre, a su vez, la válvula S.

Los movimientos de ascenso y descenso del émbolo se comunican al movimiento de rotación del árbol del motor por una biela B.

Esta descripción somera es suficiente para comprender el funcionamiento del motor.

1er tiempo (fig. 178). El émbolo se encuentra, en la posición *a*, en la parte superior de su recorrido y aspira, al descender, la mezcla combustible. (La válvula R está abierta y la válvula S cerrada.)

2° tiempo. El émbolo, situado en *b*, parte más baja de su recorrido, ha aspirado los gases combustibles, y al ascender, los comprime en la cámara de combustión. (Las válvulas R y S están cerradas.)

3er tiempo. En *c* se han encendido los gases y la presión aumenta, obligando al émbolo a descender. En este tiempo se produce el trabajo mecánico. (Las válvulas R y S continúan cerradas.)

4° tiempo. En *d*, los gases consumidos ocupan todo el volumen del cilindro, y son expulsados al exterior al ascender el pistón. (La válvula R está cerrada y la válvula S abierta.)

Al llegar a la parte superior del recorrido, se ha vuelto a la posición *a*, y empieza un segundo ciclo.

Además de las válvulas, que son accionadas mecánicamente por un árbol de levas que las levanta en el momento que deben abrirse y durante el tiempo que deben permanecer abiertas, existe otro mecanismo de acción importante: el del encendido de la mezcla gaseosa. Este encendido se hacía en otras épocas en los motores de gas de ciudad o de gas pobre, descubriendo en un momento preciso una llama que provocaba la explosión. En la actualidad se emplea casi exclusivamente la chispa eléctrica producida entre dos puntas metálicas que sobresalen de una pieza de porcelana denominada bujía; basta que se establezca un contacto eléctrico en el momento conveniente del ciclo para que se produzca el encendido del gas combustible (v. pág. 193).

Turbinas de vapor y de gas. — Un tipo de motor de origen mucho más reciente que la máquina de vapor alterna es la *turbina de vapor*, que ha adquirido un gran desarrollo en la industria eléctrica en los últimos veinte años.

Este motor se compone, en principio, de uno o varios discos que giran juntos alrededor de un mismo árbol; cada uno de los discos A, B, C ,... (*fig.* 179) lleva una serie de aletas radiales en forma de lúnulas *c* que obligan a que el vapor procedente de los estrechamientos inclinados choque con las aletas, empujándolas y produciendo un movimiento de rotación del disco del que son solidarias.

El vapor a presión utilizado adquiere, al dilatarse, una gran velocidad, y esta energía cinética así producida es la que se utiliza en la turbina. El vapor sólo abandona una parte de su velocidad al pasar a través de las aletas del primer disco, pero las aletas sucesivas, entre las cuales continúa la dilatación, suman los esfuerzos que reciben, transmitiéndose el total de estas fuerzas al árbol común.

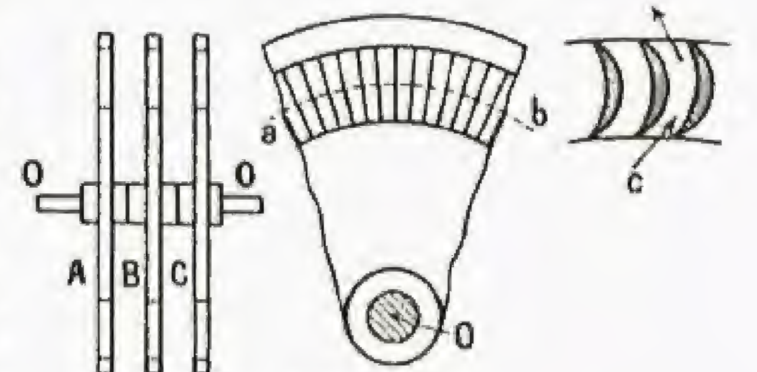


Fig. 179

El gasto de vapor de este tipo de máquinas para producir un trabajo dado puede compararse con el de las máquinas de vapor más económicas. Estos motores giran a gran velocidad y ocupan muy poco espacio. Su empleo es particularmente indicado para accionar las máquinas eléctricas de las estaciones centrales de distribución y las hélices de los paquebotes.

La turbina se ha empleado también para utilizar la fuerza de los gases calientes procedentes de la combustión a presión de mezclas gaseosas explosivas. No obstante, la alta temperatura de estos gases hace difícil la construcción de discos de aletas que resistan mucho tiempo a dicha temperatura (v. pág. 195).

Medida de la potencia de los motores térmicos. — La potencia de un motor, es decir, el trabajo que puede producir por segundo, se expresa por kilográmetros por segundo, o en caballos de vapor. El caballo de vapor es la unidad práctica de potencia, y equivale a 75 kilográmetros por segundo.

Todos los motores, térmicos o de otro tipo, tienen una *potencia útil* o *potencia efectiva*, es decir, un valor de la potencia que puede utilizarse en el exterior del motor, y que puede medirse ya sobre la polea sobre la cual se colocará la correa de accionamiento de los aparatos que han de absorber esta potencia, ya sobre el propio árbol.

El aparato que se utiliza para esta medida, puramente mecánica, se denomina *freno dinamométrico*. El modelo más sencillo de estos frenos es el llamado *freno de Prony* (*fig.* 180). Al árbol del motor se fija una polea A, sobre la que se colocan dos calzas de freno, B y C; una de ellas lleva una palanca D, equilibrada por un contrapeso E cuando el motor no gira. Una vez puesto en marcha el motor en el sentido de la flecha G, se aprietan las calzas del freno, que ejercen sobre la polea fuerzas de frotamiento que se oponen al movimiento. Inversamente, la polea A ejerce sobre las calzas B y C fuerzas opuestas a las precedentes en el sentido de la flecha G, del mismo valor F, tangentes a la circunferencia de la polea. Para evitar que estas fuerzas arras-

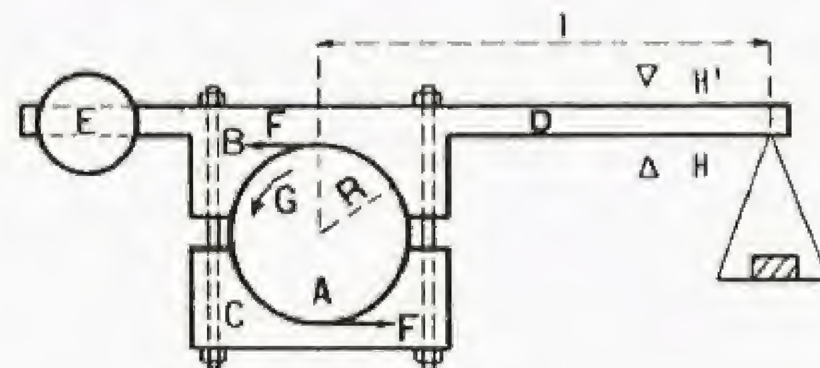


Fig. 180

tren la palanca en el sentido del movimiento, se coloca en el platillo solidario de la palanca un peso Q tal, que dicha palanca permanece en equilibrio (a igual distancia de los topes H y H'), mientras que el árbol gire a la velocidad para la cual quiere medirse su potencia. Si R es el radio de la polea y l la longitud del brazo de palanca, este equilibrio se expresa por la igualdad de los momentos con respecto al eje de las fuerzas que actúan sobre el conjunto del freno; sea

$$Q\,l = \Sigma\,F\,R.$$

Si el motor gira n veces por segundo, el trabajo de las fuerzas F será, en un segundo,

$$W = n\,\Sigma\,2\,\pi\,R\,F.$$

Si el motor desarrolla las fuerzas F, W representa el trabajo que efectúa el motor en un segundo, es decir, su potencia efectiva, cuyo valor será

$$P = n\,\Sigma\,2\,\pi\,R\,F = 2\,\pi\,n\,Q\,l.$$

Esta potencia se transforma en calor por frotamiento, por lo cual será necesario enfriar el freno durante su funcionamiento.

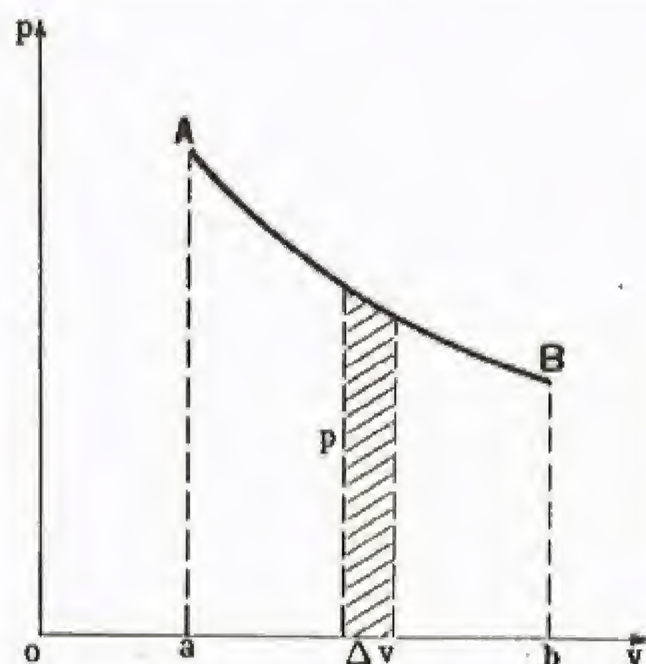


Fig. 181

El modelo anterior sólo conviene para potencias pequeñas; cuando la potencia es superior a un centenar de caballos de vapor, se utilizan frenos hidráulicos o eléctricos.

En el caso más especial de los motores térmicos, se efectúa también otra medida de la potencia, denominada *potencia indicada.* Esta potencia difiere de la potencia efectiva, y mide el trabajo producido por el vapor o por los gases en el propio cilindro del motor y en cada ciclo completo.

Esta medida se basa en la expresión del trabajo de un gas cuyo volumen varíe Δv a una presión fija p. Si se supone, por ejemplo, este gas situado dentro de un cilindro bajo un émbolo de sección s, ejerce sobre éste una fuerza $F = p\,s$. Cuando el émbolo desplaza Δl, al aumentar el volumen que ocupa el gas, el trabajo de la fuerza F será, en magnitud y signo.

$$W = F\,\Delta l = p e s\,\Delta l = p\,\Delta v.$$

Si se considera un gas que sufra variaciones de volumen y de presión, el trabajo que realiza contra las fuerzas exteriores, positivo cuando aumenta su volumen, y negativo cuando disminuye, será

$$W = \int p\,dv.$$

Si se representa la presión del gas en función de su volumen en todo momento, por una curva AB, el trabajo W estará representado por el área AB*ba* comprendida entre la curva y el eje de las abscisas (*fig.* 181).

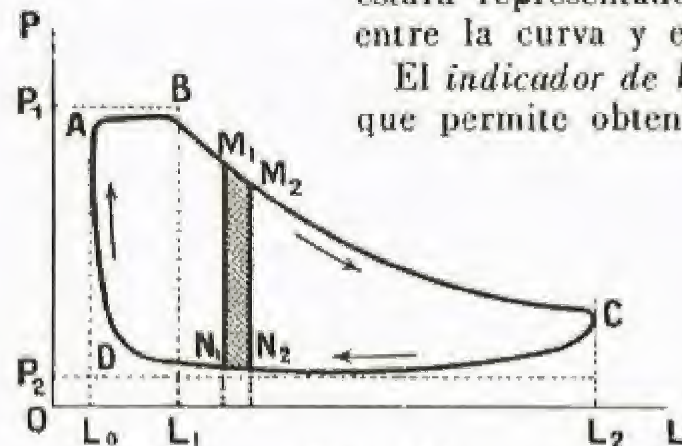


Fig. 182

El *indicador de Watt* es un aparato de inscripción que permite obtener durante toda la duración del ciclo el valor de la presión en función de la posición del émbolo, es decir, en definitiva, del volumen que ocupa el gas. La figura 182 muestra, a título de ejemplo, una forma de gráfico para un ciclo de una máquina de vapor. Los valores de la presión P se indican en ordenadas para cada posición del émbolo, y los desplazamientos L del pistón se indican en abscisas. El ciclo se recorre en el sentido de las agujas de un reloj, indicado por las flechas.

En A, el émbolo está en la parte inferior de su recorrido, admitiéndose el vapor durante su recorrido AB; después de un desplazamiento L_0L_1 se cierra la admisión, y el recorrido L_1L_2 se produce por la aspiración del vapor, cuya presión disminuye de B a C; en este momento se abre el escape, la curva CD es casi una recta horizontal, a una presión muy aproximada a la del exterior, o a la del condensador P_2. Aumenta entonces bruscamente desde D a A, después del cierre del escape durante la abertura de la admisión.

Para un desplazamiento pequeño del émbolo, correspondiente a la parte M_1M_2 de la curva, el trabajo del vapor se representa por el área comprendida entre el arco M_1M_2 y su proyección sobre el eje de las abscisas; este trabajo es positivo, puesto que el volumen aumenta; para el desplazamiento N_2N_1, efectuado en sentido inverso, el trabajo es negativo, y su representación es análoga. Para el conjunto de las dos partes del trayecto, el trabajo efectuado por el vapor se representa por la superficie sombreada de la figura. Como lo mismo ocurrirá en todos los puntos restantes del recorrido, se deduce que el trabajo en un ciclo está representado por el área del ciclo.

Es evidente que la superficie del diagrama dado por el indicador deberá multiplicarse por un coeficiente conveniente, para reducir la longitud L_0L_2 del recorrido al valor real del volumen, así como las presiones P_1 y P_2.

Para las velocidades, mucho mayores, de los motores de explosión, se han construido aparatos especiales. Los indicadores de Watt ordinarios, concebidos para las velocidades corrientes de los motores de vapor, no convenían para velocidades diez y veinte veces mayores, a causa de la inercia demasiado importante de las piezas móviles que los componían. Se han construido aparatos ópticos, conocidos con el nombre de *manógrafos,* para los motores de gran velocidad de rotación, que han permitido estudiar el ciclo de los motores de combustión interna.

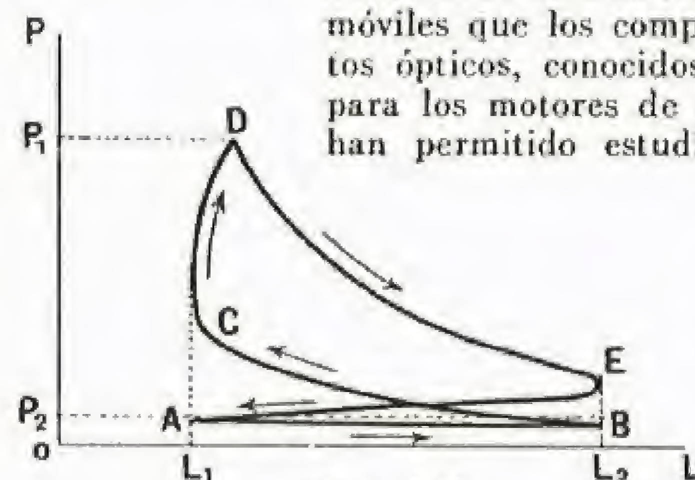


Fig. 183

Este ciclo, como ya se ha dicho, difiere del anterior en que suele por lo general ser de cuatro tiempos en lugar de los dos del motor de vapor. La figura 183 lo representa esquemáticamete. Supongamos que se recorre el ciclo partiendo del punto A, en el cual la presión ejercida sobre el émbolo es igual a la presión atmosférica. El primer tiempo, representado por la rama AB del ciclo, es la aspiración, que se produce con una depresión pequeña. El segundo tiempo es, al contrario, el de la compresión de los gases que acaban de aspirarse, BC. Después se produce la combustión del gas y el aumento de la presión hasta D y la aspiración de los gases quemados de D a E, que constituye el tercer tiempo; por último, los gases quemados salen al exterior, desde E al punto inicial A.

En este gráfico puede observarse que, en la parte superior de la curva, el contorno es seguido en el sentido de las agujas de un reloj, mientras que en la parte inferior el sentido es inverso. Puesto que la superficie de la curva de sentido directo representa el trabajo positivo suministrado al émbolo, es evidente que la superficie de la curva recorrida en sentido inverso es un trabajo negativo, es decir, realizado por el émbolo, que debe, pues, substraerse de la primera superficie.

La medida del trabajo por los indicadores de Watt, o por los manógrafos, es diferente de la que indica el freno, denominada potencia efectiva, mientras que la primera es la potencia indicada. Ésta es siempre algo mayor que la potencia efectiva. Existe, en efecto, entre los dos puntos, el cilindro y la polea de accionamiento, en los cuales se instalan los dos aparatos de medida, órganos mecánicos móviles y frotantes que transforman una parte de la potencia indicada P_i en calor, parte que no es aprovechada. Esta cantidad es bastante pequeña comparada con la potencia total, y el cociente entre la potencia efectiva P_e y la potencia indicada P_i se denomina rendimiento mecánico del motor R:

$$R = \frac{P_e}{P_i}.$$

Principio de Carnot

Segundo principio de termodinámica. — El principio de Carnot se divide en dos partes. La primera es que la producción de calor va siempre acompañada por una disminución de la temperatura, y es, de nuevo, el enunciado de un hecho que se observa generalmente en todas las transformaciones de calor en trabajo. La generalización de este resultado experimental constituye el postulado de Carnot, que puede expresarse de la siguiente forma:

En toda máquina térmica, el sistema objeto de la transformación debe sufrir una disminución de temperatura, y sólo podrá producirse trabajo por la pérdida de calor del cuerpo que pasa de cierta temperatura a otra temperatura más baja.

Toda máquina de vapor consta, en efecto, de una fuente de calor, que es la caldera que produce el vapor y que contiene una cantidad de calor Q_1. Esta cantidad de calor sólo se transforma parcialmente en trabajo porque el condensador absorbe una cantidad de calor Q_2 que nunca es nula. El trabajo que corresponde a la cantidad de calor perdida será, pues,

$$W = J\,(Q_1 - Q_2).$$

Si hubiera podido transformarse en trabajo el calor proporcionado por la caldera, se tendría:

$$W' = J\,Q_1.$$

El *rendimiento teórico* será:

$$R = \frac{J\,(Q_1 - Q_2)}{J\,Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

Como Q_2 no es nunca nula, el rendimiento R es siempre menor que la unidad

$$R = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}.$$

El coeficiente $\frac{Q_1}{Q_2}$ se denomina con frecuencia *coeficiente de pérdida* del motor.

El teorema que constituye la segunda parte del principio de Carnot se establece matemáticamente, con arreglo al valor del rendimiento R que acaba de enunciarse y basándose en el principio de equivalencia. Este teorema es el siguiente:

En toda máquina térmica reversible, el rendimiento teórico máximo es independiente de la naturaleza del cuerpo que sufre la transformación y sólo depende de las temperaturas del hogar y del refrigerante.

Este rendimiento teórico R_m viene dado por la relación

$$R_m = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

siendo T_1 y T_2 las temperaturas absolutas respectivas del hogar y del refrigerante, o si las temperaturas se expresan en grados centesimales

$$R_m = \frac{(t_1 + 273) - (t_2 + 273)}{t_1 + 273} = \frac{t_1 - t_2}{t_1 + 273}.$$

Pueden aplicarse estos datos, a título de ejemplo, al caso de una máquina de vapor cuya caldera proporcione vapor saturante a una presión de 12 kg/cm². Sabemos que la temperatura de este vapor es de 187° C. El vapor de escape pasa al condensador, que está, por ejemplo, a la temperatura de 37° C. El rendimiento máximo del ciclo recorrido por el vapor será

$$R_m = \frac{187 - 37}{187 + 273} = \frac{150}{450} = 0{,}33.$$

No será, pues, posible utilizar, en estas condiciones, más que 1/3 de la potencia representada por la cantidad de calor recibida por el vapor en la caldera durante la unidad de tiempo.

Fácilmente se comprueba que el rendimiento máximo aumenta si se eleva la temperatura T_1, o si se disminuye la temperatura T_2. Aunque esta segunda operación es difícil de realizar prácticamente, porque no se puede disminuir la temperatura de una fuente natural, es en cambio posible aumentar la temperatura del generador de vapor aumentando su presión.

Esto es lo que se ha realizado en algunas calderas, como la de Serpollet, en la que se alcanzaba una presión de aproximadamente 80 atmósferas. Como la temperatura del vapor era entonces 300° C, aproximadamente, el rendimiento máximo, si se admite como temperatura del condensador 40°, será

$$R_m = \frac{300 - 40}{573} = \frac{260}{573} = 0{,}45.$$

Ciclo de Carnot. — Una máquina que funcione según el principio de Carnot y cuyo rendimiento efectivo sea igual al rendimiento máximo constituye una máquina perfecta, que no puede realizarse prácticamente, pero cuyos caracteres deben conocerse a fin de ajustarse a ellos en la medida de lo posible.

Las transformaciones a que se somete un fluido pueden realizarse de dos formas completamente distintas:

1° A temperatura constante se obtiene una compresión o una expansión llamada *isotérmica*, que es la que se produce cuando la variación del volumen se hace en un recinto mantenido a temperatura constante, que absorbe todo el calentamiento producido en el gas o en el vapor, o que cede el calor si la temperatura tiende a bajar a causa de la expansión. Si se trata de un gas al que pueda aplicarse la ley de Mariotte, la curva de presión en función del volumen será una hipérbola equilátera representada por la ecuación

$$pv = \text{constante};$$

2° Cuando el recinto en el que se producen la expansión y la compresión está completamente aislado del calor, sin que pueda reducirse ninguna de las variaciones de la temperatura del medio que ocupa este recinto por una pérdida de calor a través de las paredes, la transformación se llama *adiabática.*

Se demuestra que la ecuación que liga el vapor del volumen con la presión es, para un gas perfecto,

$$pv^{\gamma} = \text{constante},$$

en la cual $\gamma = \dfrac{C}{c}$ es el cociente de los calores específicos del gas (v. pág. 40).

Supongamos una máquina térmica que funcione entre las temperaturas T_1 y T_2; ¿a qué transformaciones deben someterse los cuerpos empleados entre estos límites para obtener el rendimiento máximo?

El ciclo cerrado que representa la variación de las presiones y de los volúmenes del gas en los diferentes puntos del recorrido del émbolo de un motor debe representarse por una curva formada por dos isotermas que corresponden a las temperaturas T_1 y T_2, mutuamente ligadas por dos adiabáticas.

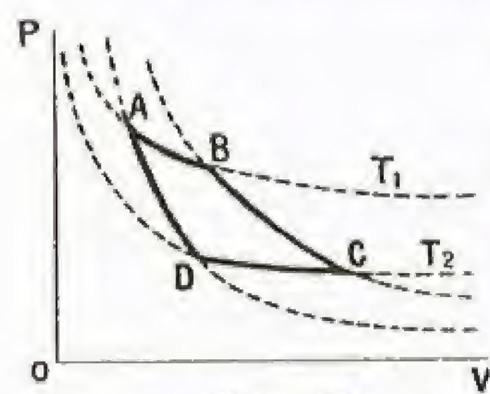


Fig. 184

Consideremos lo que sería una máquina de vapor perfecta (*fig.* 184). Vamos a describir el ciclo partiendo del punto A, que corresponde al momento en que comienza la admisión del vapor debajo del émbolo. Esta expansión debe hacerse sin variación de temperatura, siguiendo la isoterma AB, a la temperatura T_1 del vapor admitido. En B, cesa la admisión y los gases se expanden siguiendo la curva BC, que es una porción de adiabática entre las temperaturas T_1 y T_2. Cuando el émbolo llega al punto C, hay un retroceso y un escape del vapor siguiendo la isoterma CD a la temperatura T_2. En el punto D, el escape está cerrado y hay compresión, con calentamiento por la porción de adiabática DA.

Este ciclo, que es el que debería seguir una máquina perfecta, se denomina *ciclo de Carnot.* Tiene la propiedad de ser reversible, es decir, de poder ser recorrido indistintamente en un sentido o en otro, y de dar el rendimiento teórico máximo.

Estas condiciones son, naturalmente, irrealizables, y hemos visto que la forma práctica del ciclo que se consigue en un motor de vapor de buena construcción (*fig.* 183) es bastante diferente del ciclo de Carnot, aunque en él vuelven a encontrarse los elementos principales, con diferencias que son la causa de que su rendimiento sea inferior al que se obtendría siguiendo fielmente el ciclo teórico. La condición de reversibilidad exige, en efecto, un equilibrio constante (equilibrio de presión y de temperatura) entre el sistema que sufre la transformación y el medio exterior.

Degradación de la energía. — De los dos principios de la termodinámica que acabamos de estudiar, el primero, de conservación de la energía, permite afirmar que cualquiera que sea la transformación completa o parcial que ésta sufra su total permanece siempre constante; el segundo, el de Carnot, nos muestra que, aunque esta energía sea constante, no puede transformarse totalmente cuando se pasa del calor a la energía mecánica.

Es innegable que la transformación de energía mecánica en energía eléctrica no se produce nunca con un rendimiento igual a la unidad, ya que la energía mecánica se transmite por órganos sometidos a rozamiento, y la energía eléctrica, antes de ser producida por el generador, atraviesa conductores de resistencia apreciable. Los rozamientos mecánicos y la resistencia eléctrica son causas de degradación de la energía en forma de calor inaprovechable. Es una pérdida de rendimiento industrial, pero el rendimiento teórico de esta transformación sigue siendo igual a la unidad y puede concebirse que se aproximará cada vez más a ella si se multiplican las precauciones contra las pérdidas por el rozamiento y la mala conductibilidad.

En el caso del calor y de su transformación en trabajo mecánico no ocurre lo mismo. El teorema de Carnot limita el máximo de energía térmica que puede transformarse en energía mecánica a un porcentaje del total, tanto mayor cuanto más elevada es la temperatura del hogar. Por consiguiente, la forma calorífica de la energía no vale, en su transformación, únicamente por su cantidad, sino también por su condición de encontrarse a una temperatura más o menos elevada.

Se llega a la conclusión de que el calor, aunque obedece al principio de conservación de la energía, pierde, no obstante, cualitativamente al disminuir de temperatura. Es una forma degradada de la energía, que no tiene todas las cualidades de las restantes formas, mecánica, eléctrica, química, etc. Además, bajo estas otras formas, las pérdidas de rendimiento observadas en las transformaciones son siempre debidas a una producción de calor generalmente inutilizable.

Para mostrar la importancia de la cualidad del calor al lado de su cantidad, cita Brunhes el siguiente hecho:

"Una fuente termal rica, capaz de proporcionar 3 000 litros por hora a la temperatura de 45° C, representa una fuente de calor abundante. Si se supone que la temperatura exterior sea de 15°, se tendrán 30 calorías grandes por litro, o sea 90 000 calorías grandes por hora proporcionadas gratuitamente desde el interior de la tierra: a pesar de ello, con todas estas calorías no es posible cocer un huevo.

"Para cocer un huevo basta conservarlo tres minutos en agua hirviendo, pero es necesario que hierva el agua, y las innumerables calorías que podría proporcionar una fuente a 45° C no pueden suplir unas pocas calorías a 100° C."

La causa, pues, de que el rendimiento de todas las transformaciones de energía, cualquiera que sea su forma, sea inferior a la unidad, reside en el hecho de que una parte mayor o menor de ella se transforma en calor, de temperatura demasiado baja para que puedan utilizarse con un rendimiento aceptable.

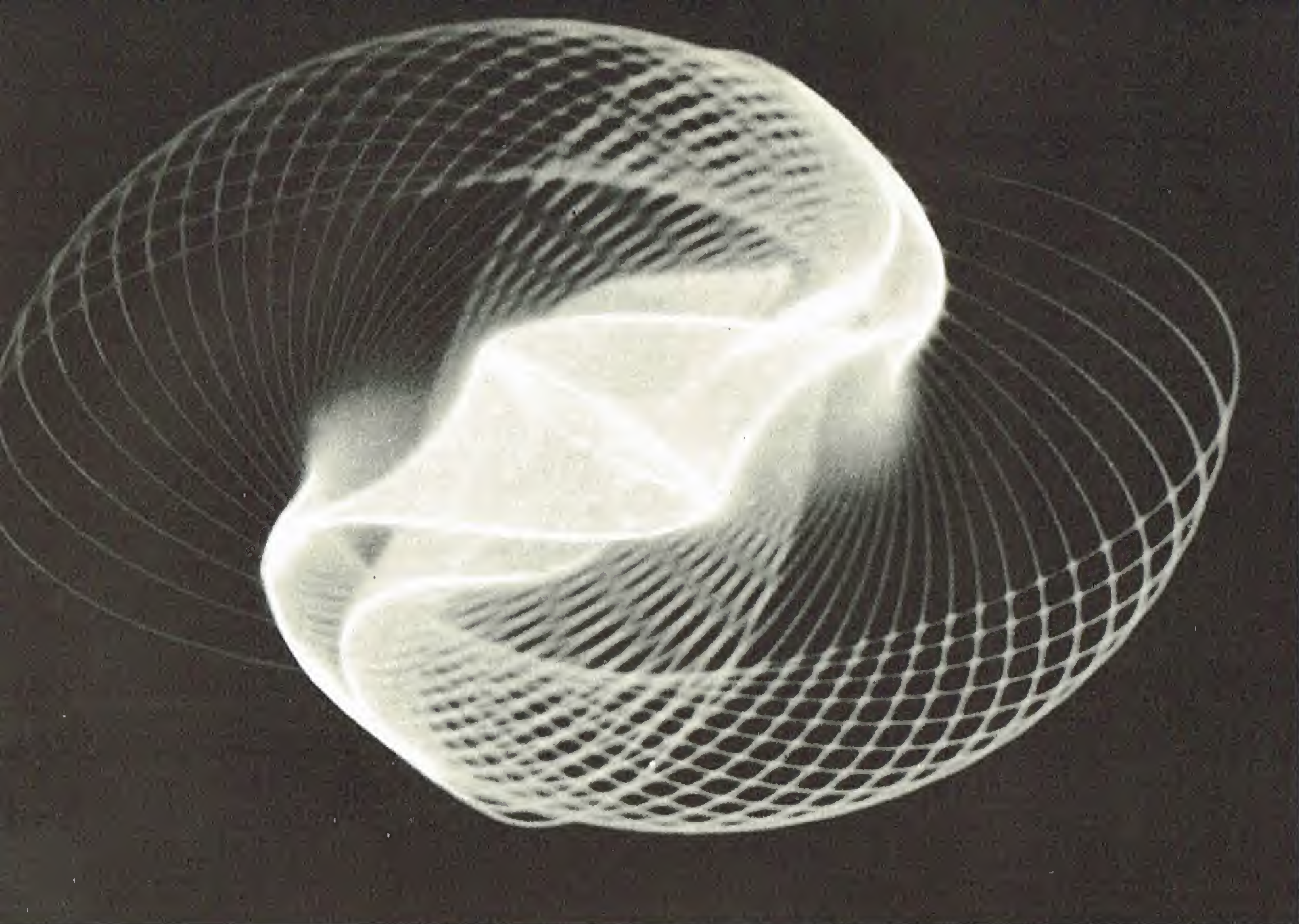
No existe, no obstante, como en la citación de Brunhes, una temperatura fija por debajo de la cual el agua caliente no pueda proporcionar energía mecánica, ni tampoco una diferencia mínima entre la fuente caliente y la fuente fría. Un ejemplo de ello es el nuevo método de utilización del calor de los mares, debido a Claude y Boucherot.

La temperatura de la superficie del agua del mar, en las regiones tropicales del Atlántico, es aproximadamente de 25 a 28° C, mientras que a unos cuantos centenares de metros de profundidad esta temperatura sólo es de 4 a 5° C. Esta pequeña diferencia de temperatura que hasta ahora se ha considerado como inutilizable, no lo es en realidad enteramente, y puede servir para alimentar una máquina de vapor que funcione entre estas dos temperaturas (25° C y 4° C) con un rendimiento teórico de

$$\frac{25 - 4}{273 + 25} = 0{,}07.$$

La cantidad de calor comprendida entre estas dos temperaturas contiene, pues, el 7 por ciento de energía transformable y, dada la cantidad casi ilimitada de esta energía, existe una riqueza natural que puede ser tan importante como la de los saltos de agua.

P. Bary y R. Touren



Un curioso efecto fotográfico obtenido por la materialización luminosa de movimientos pendulares conjugados (Doc. Esso) [*Fot. David*]

Movimientos vibratorios

Las vibraciones desempeñan una función muy importante en física porque, independientemente de su importancia en mecánica y, por consiguiente, en acústica, constituyen una imagen preciosa para la comprensión de un gran número de fenómenos ópticos y eléctricos. Forman parte de un tipo general de fenómenos denominados fenómenos periódicos, que estudiaremos a continuación.

Fenómenos periódicos

Función periódica. Período. Función sinusoidal. Movimiento vibratorio simple. Fase. Fuerza capaz de producir un movimiento sinusoidal. Principio de los pequeños movimientos. Valor medio de una función periódica. Valor medio de una función sinusoidal durante un semiperíodo. Valor eficaz de una función periódica durante un periodo. Diferencia de fases entre dos funciones sinusoidales del mismo periodo. Suma de dos funciones periódicas del mismo período (composición de dos movimientos vibratorios simples). Suma de funciones sinusoidales de períodos muy próximos: batimientos. — **Funciones periódicas amortiguadas:** Propagación de un movimiento vibratorio. Velocidad de propagación. Punto fuente. Longitud de onda. Vibraciones transversales. Vibraciones longitudinales. Vibraciones transversales. Propagación de la onda. Condensación. Dilatación. Líneas de onda; superficies de onda. Interferencias. Principio de la composición de pequeños movimientos. Interferencias producidas por dos fuentes de igual periodo. Generalización. Procedimientos de estudio de los movimientos vibratorios: Inscripción. Método estroboscópico. — Reflexión de las ondas: Reflexión de la propagación de un movimiento sobre un extremo fijo. Reflexión de la propagación de un movimiento sobre un extremo libre. Ondas estacionarias. Estudio analitico. Caso de las ondas longitudinales

Función periódica. Período. — Se dice que una magnitud es función periódica del tiempo t cuando el número x que mide esta magnitud reproduce el mismo valor al aumentar el tiempo una duración determinada T; es decir, cuando la relación (1) $x = f(t)$ entre x y t es tal que $f(t + T) = f(t)$ para cualquier valor de t.

El intervalo de tiempo T se denomina período del fenómeno periódico considerado.

Función sinusoidal. Movimiento vibratorio simple.—La función periódica más sencilla es la función sinusoidal, cuya importancia se debe además a que cualquier función periódica puede considerarse como una suma de funciones sinusoidales.

La función sinusoidal se define de la siguiente forma: consideremos como un fenómeno periódico especialmente sencillo el del movimiento de un punto M, que describe una circunferencia con una velocidad angular constante ω (en radiales/segundo); tal movimiento es periódico, y su período es el tiempo que tarda el móvil en girar un ángulo igual a 2π radianes: $T = \frac{2\pi}{\omega}$ (*fig.* 185).

Escojamos un punto en la circunferencia O, que servirá como origen para fijar la posición del móvil sobre la misma: arcos y un sentido positivo para contarlos, por ejemplo, el sentido del movimiento. El tiempo se cuenta a partir de un origen arbitrario; puede escogerse como origen de tiempos, por ejemplo, el instante en que el móvil M pasa por el punto O, origen de espacios. Entonces la posición del móvil en el instante t queda determinada por la ecuación $s = \omega t$, si s mide el arco OM.

La posición del móvil en cada instante puede también definirse por el valor de la proyección Cm de CM sobre el eje Cx, contada positivamente desde C hasta O; se tendrá la relación: $Cm = a \cos \omega t$, siendo a el radio de la circunferencia descrito por el móvil.

La ecuación $x = a \cos \omega t$ define x como una función sinusoidal del tiempo y permite determinar la posición del punto m para un valor cualquiera del tiempo; la denominaremos "ecuación del movimiento" del punto m, y diremos que este movimiento es sinusoidal.

x y sus derivadas, x', x'', es decir, la elongación del punto m, su velocidad y su aceleración reproducen los mismos valores cuando el arco $s = \omega t$ aumenta 2π, y por consiguiente cuando el tiempo aumenta $\frac{2\pi}{\omega}$; el movimiento sinusoidal del punto m es, pues, un movimiento periódico del mismo período $T = \frac{2\pi}{\omega}$ que el movimiento de rotación uniforme del punto M.

Fig. 185

El movimiento sinusoidal del punto m se denomina también *movimiento vibratorio simple*. Este movimiento es también el del péndulo, cuando la amplitud de las oscilaciones es suficientemente pequeña para que pueda confundirse sin error sensible esta amplitud, calculada en radianes, con su seno; por esto, el movimiento sinusoidal se llama también "movimiento pendular" (v. Gravedad, pág. 15).

Observación. Pudiera sorprender denominar "movimiento sinusoidal" al movimiento cuya ecuación se expresa por un coseno; pero obsérvese que, como ya se ha indicado, el instante escogido como origen de tiempos es absolutamente arbitrario. Si tomamos como origen de tiempos el instante en que el móvil M pasa por el punto O', es decir, el instante en que el punto m pasa por el punto C, en el instante cero, el arco s será igual a $-\frac{\pi}{2}$; en el instante t, $s = -\frac{\pi}{2} + \omega t$ y, por consiguiente,

$$x = a \cos \left(-\frac{\pi}{2} + \omega t \right) = a \cos \left(-\frac{\pi}{2} + \omega t \right) = a \operatorname{sen} \cdot \omega t.$$

Así, puede representarse el mismo movimiento del punto m por un coseno o un seno, según se haya escogido el origen de tiempos; en general, la ecuación del movimiento de m es: $x = a \cos (\omega t + \alpha)$, si en el instante escogido como origen de tiempos el móvil M se encuentra en M_0, de forma que el ángulo OCM $= \alpha$.

Si se construye la curva $x = a \cos \omega t$, que representa las variaciones de x en función del tiempo (*fig.* 186), cambiar el origen de tiempos, tomando, por ejemplo, un instante anterior a $\frac{T}{4}$, equivale simplemente a trasladar $\frac{T}{4}$ el eje de ordenadas, es decir, desde Ox a O_1x_1.

Fig. 186

En resumen, un movimiento sinusoidal o pendular cualquiera puede representarse siempre por una ecuación de la forma:

$$x = a \operatorname{sen} (\omega t + \alpha) \text{ o } x = a \cos (\omega t + \alpha),$$

siendo a el valor máximo de la elongación, es decir, la amplitud del movimiento; ω, una de las constantes, ligada al período T por la relación $T = \frac{2\pi}{\omega}$, y α una constante que depende del instante escogido como origen de tiempos.

Ejemplo. *Hallar la ecuación del movimiento del extremo del brazo de un diapasón que efectúa 500 vibraciones por segundo, con una amplitud de 1/10 de mm.*

Tomemos como origen de tiempos el instante en que el diapasón pasa por su posición de equilibrio, es decir, $x = 0$, para $t = 0$; la ecuación del movimiento es de la forma: $x = a \operatorname{sen} \omega t$, siendo $a = \frac{1}{10}$ mm; $T = \frac{1}{500}$ y, por consiguiente, $\omega = 1\,000\ \pi$; la ecuación del movimiento será, pues:

$$x = \frac{1}{10} \operatorname{sen} 1\,000\ \pi t.$$

Observación. Como $x = a \cos (\omega t + a)$ es la proyección del vector CM en el instante t, podrá hacerse corresponder a todo movimiento sinusoidal un vector que gire uniformemente con una velocidad angular $\omega = \frac{2\pi}{T}$ y cuya longitud sea la de la amplitud de las oscilaciones del movimiento sinusoidal.

Fase. — Se denomina fase del movimiento en un instante t el arco $\omega t = \alpha$ afectado por la razón seno o coseno. Cualquier cambio en el origen de tiempos modifica la fase del movimiento.

Fuerza capaz de producir un movimiento sinusoidal. — ¿Qué ley regirá la fuerza capaz de producir un movimiento sinusoidal? Para encontrar su expresión, bastará con aplicar la relación fundamental de la dinámica del punto material. Si m es la masa del punto material, f la fuerza y γ la aceleración que le comunica, se tendrá la relación vectorial $f = m\gamma$ (v. Mecánica, p. 239, v. V); en el caso actual, como el movimiento es rectilíneo, la aceleración estará dirigida según la recta descrita por el móvil (v. Mecánica, p. 234, v. V), y será igual a la derivada de la velocidad $\gamma = \frac{dv}{dt}$; por consiguiente, la fuerza será igual a $m \frac{dv}{dt}$.

Sea $x = a \operatorname{sen} \omega t$ la ecuación del movimiento sinusoidal: se tendrá: $v = a\omega \cos \omega t$ y $\gamma = -\omega^2 a \operatorname{sen} \omega t$; el vector fuerza será igual a $f = -m\omega^2 a \operatorname{sen} \omega t$, es decir, a $f = -m\omega^2 x$.

Esta ecuación muestra que el vector fuerza es siempre de signo contrario al de la elongación; la fuerza que produce el movimiento está constantemente dirigida hacia el centro C de las oscilaciones y es, además, proporcional a la elongación, de donde se llega al enunciado siguiente:

Movimiento sinusoidal es el producido por una fuerza de atracción hacia un centro fijo proporcional a la distancia del móvil a dicho centro.

Caso del péndulo. Es fácil ver que, en el caso del péndulo, la fuerza de atracción hacia la posición de equilibrio es proporcional a la elongación para amplitudes bastante pequeñas.

Sea (*fig.* 187) un péndulo simple de longitud l; consideremos elongaciones suficientemente pequeñas para que pueda confundirse el seno del ángulo de desviación θ con el propio ángulo, y el arco s = CP con la distancia CM contada sobre la tangente. El péndulo está sometido a su peso mg y a la tensión del hilo; la componente del peso según el hilo queda neutralizada por la reacción del hilo y, como la trayectoria es sensiblemente rectilínea, sólo queda la componente tangencial del peso, es decir, $f = -mg \operatorname{sen} \theta$, o bien, puesto que θ se supone bastante pequeño: $f = -mg\ \theta$; teniendo en cuenta que $s = x = l\theta$, y por consiguiente $f = -mg \frac{x}{l}$, se tratará de una fuerza de atracción proporcional a su distancia al punto C.

Si se compara la expresión anterior con la expresión general $f = -m\omega^2 x$, se tendrá $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$, siendo el período T de las oscilaciones $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$, que es la conocida fórmula del péndulo.

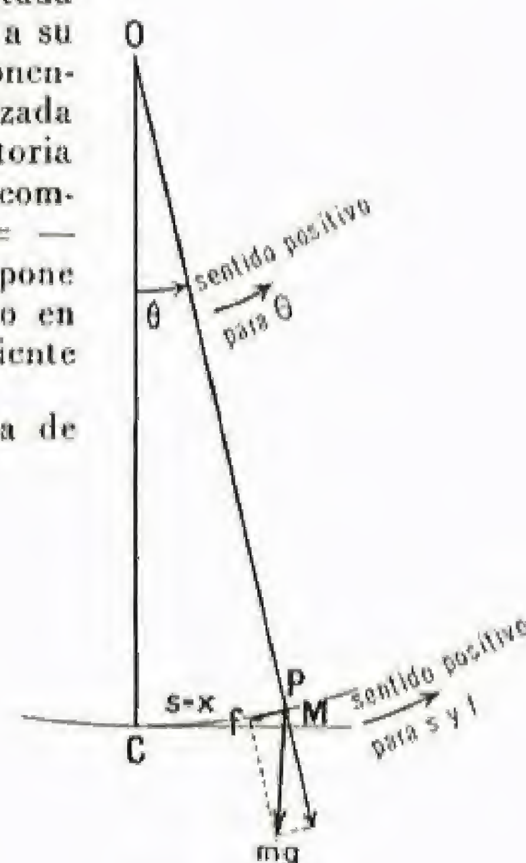


Fig. 187

Principio de los pequeños movimientos. — Consideremos un "medio elástico", es decir, un medio constituido por puntos materiales entre los cuales existen fuerzas de enlace que tienden a mantener constantes las distancias entre los diferentes puntos del medio; estas fuerzas son nulas cuando los valores de dichas distancias están bien determinados, diciéndose entonces que el medio está "en equilibrio"; si uno de los puntos del medio se desplaza de su posición de equilibrio, se origina una fuerza elástica de atracción que es función de la elongación x del punto con respecto a su posición de equilibrio; esta función $f = F(x)$ es tal que cuando $x = 0$ será nula.

Consideremos ahora un medio elástico, y supongamos que un punto del medio se desvía ligeramente de su posición de equilibrio: se demuestra en análisis que cualquiera que sea la forma de la función $F(x)$, es decir, cualquiera que sea la ley de atracción elástica del medio, podrá establecerse, para elongaciones pequeñas, $f = -k^2 x$. Bajo la acción de tal fuerza de atracción, proporcional a la elongación, el movimiento del punto será sinusoidal y vibratorio, de lo cual se deduce el siguiente enunciado, muy importante:

Si en un medio elástico cualquiera se desvía ligeramente uno de sus puntos de su posición de equilibrio y se le abandona a sí mismo, el movimiento de dicho punto bajo la acción de las fuerzas elásticas de recuperación es un movimiento oscilatorio y sinusoidal alrededor de su posición de equilibrio.

La importancia de este enunciado se debe a su generalidad, ya que se aplica, por ejemplo, a las vibraciones de los sólidos (diapasones, cuerdas vibrantes) y de los gases (tubos sonoros); el movimiento de un punto del medio es sinusoidal, cualquiera que sea el medio, es decir, cualquiera que sea la ley elástica de recuperación, "si la deformación inicial es pequeña"; el movimiento podrá también ser sinusoidal para grandes deformaciones en el caso particular en que la fuerza elástica de recuperación siga siendo proporcional a su distancia a la posición de equilibrio para estas grandes deformaciones, como sucede, por ejemplo, con un muelle en el que la fuerza elástica es proporcional a su extensión.

Valor medio de una función periódica. — Sea $x = f(t)$ una función periódica cualquiera de período T; se denomina, por definición, "valor medio" de esta función a la cantidad $x_m = \frac{1}{T} \int_0^T f(t)\, dt$

en la que el símbolo $\int_0^T f(t)\,dt$ representa, como es sabido, la diferencia $F(T) - (F(0)$, siendo $F(t)$ una función primitiva de $f(t)$.

Obsérvese que esta definición es bastante intuitiva: consideremos, por ejemplo, un obrero que haya ganado 800 francos al día durante 2 días: después, 900 francos en un día, 750 francos al día durante 3 días, y que el séptimo día no haya ganado nada; el salario medio de este obrero por semana sería:

$$\frac{1}{7}(800 \times 2 + 900 \times 1 + 750 \times 3 + 0 \times 1);$$

análogamente, puede considerarse que la función x tiene el valor $f(t)$ durante el tiempo infinitamente pequeño dt, y para obtener su valor medio durante el intervalo de tiempo T se divide por T la suma $\left(\int_0^T f(t)\,dt.\right)$ de las cantidades $f(t)\,dt$, operación que se indica precisamente por el símbolo $\frac{1}{T}\int_0^T f(t)dt$.

Interpretación geométrica: si se construye la curva que representa las variaciones de la función $x = f(t)$, un elemento diferencial $f(t)\,dt$ corresponderá al área elemental de un rectángulo MM′ mm′ (*fig.* 188) y la cantidad $\int_0^T f(t)\,dt$ corresponde al área ABCD comprendida entre la curva, el eje de tiempos y las ordenadas inicial y final de abscisas 0 y T; el valor de esta área es, como es sabido, la diferencia $F(T) - F(0)$, siendo $F(t)$ una función primitiva de $f(t)$.

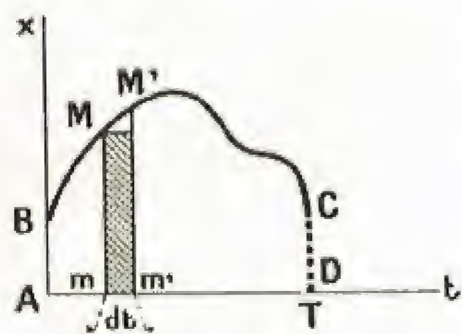


Fig. 188

Si la función periódica $f(t)$ es simétrica con respecto al eje de tiempos (*fig.* 189), el valor medio durante un período es nulo; así sucede, en particular, con la función sinusoidal, en cuyo caso el valor medio de la función durante un semiperíodo, o "alternancia", es igual y de signo contrario al valor medio de la función durante la alternancia siguiente.

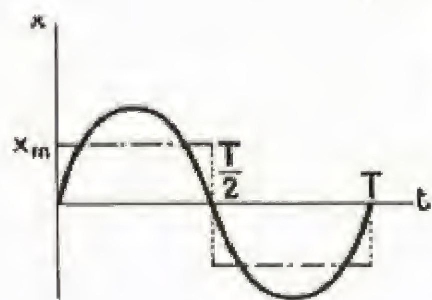


Fig. 189

Valor medio de una función sinusoidal durante un semiperíodo. — Es, por definición, la cantidad $\frac{1}{\frac{T}{2}}\int_0^{\frac{T}{2}} a \text{ sen } \omega t \,.\, dt$;

la función primitiva de a sen ωt es $-\frac{a}{\omega}\cos \omega t$; y el valor medio será

$$-\frac{1}{\frac{T}{2}}\,\frac{a}{\omega}\left(\cos\frac{\omega T}{2} - \cos 0\right) = 2\,\frac{a}{\pi},$$

o sea los dos tercios del valor máximo.

Este resultado se utilizará, en particular, para la expresión de la intensidad media de una corriente alterna sinusoidal durante una alternancia.

Valor eficaz de una función periódica durante un período. — El cuadrado del "valor eficaz" de una función periódica durante un período es, por definición, el valor medio del cuadrado de esta función con respecto a un período. Estos valores eficaces intervienen, en particular, en el estudio de las corrientes alternas, y suelen representarse por letras mayúsculas.

Sea, por ejemplo, $i = i_0$ sen ωt la intensidad de una corriente alterna sinusoidal; la intensidad eficaz, que se representa por las notaciones I o i_{eff} es, por definición

$$i^2_{eff} = \frac{1}{T}\int_0^T i_0^2 \text{sen}^2\,\omega t \cdot dt.$$

La integral $\int_0^T i^2_0 \text{ sen}^2\,\omega t \cdot dt$ es fácil de calcular, puesto que $\text{sen}^2\,\omega t = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\,\omega t)$; y por consiguiente

$$\int_0^T i_0 \text{ sen}^2\,\omega t \cdot dt = \frac{i_0^2}{2}\left[\int_0^T dt - \int_0^T \cos 2\,\omega t \cdot dt\right];$$

la segunda integral es nula, porque

$\int_0^T \cos 2\,\omega t \cdot dt = \frac{1}{2\omega}\left[\text{en } 2\,\omega t\right]_0^T$; de donde se deduce que

$$i_{eff} = \frac{i_0}{\sqrt{2}}.$$

Diferencia de fases entre dos funciones sinusoidales del mismo período. — Consideremos dos funciones sinusoidales: $x_1 = a_1 \cos(\omega t + \alpha_1)$ y $x_2 = a_2 \cos(\omega t + \alpha_2)$ del mismo período, $T = \frac{2\pi}{\omega}$, cuyas amplitudes a_1 y a_2 pueden ser o no iguales; se denomina *diferencia de fases* la diferencia

$$(\omega t + \alpha_1) - (\omega t + \alpha_2)$$

de sus fases; si esta diferencia es nula, es decir, si las fases son iguales, se dice que estas dos funciones están "en fase" o "en concordancia"; cuando la diferencia de las fases es π, se dice que están "en oposición"; en este caso, las dos funciones tienen constantemente signos contrarios, y si sus amplitudes son iguales, su suma es siempre nula. Por último, cuando la diferencia de fases es $\frac{\pi}{2}$, se dice que las dos funciones están "en cuadratura".

Los vectores axiales que pueden hacerse corresponder a cada una de las funciones se disponen respectivamente como indica la figura 190.

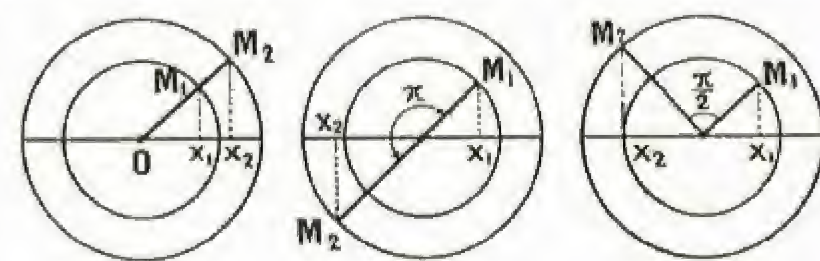


Fig. 190

OBSERVACIÓN. En una función de forma $x = a \cos(\omega t + \alpha)$, se destaca generalmente el signo de α; si se escribe $x_1 = a_1 \cos(\omega t + \alpha_1)$, se supone $\alpha_1 > 0$, y a esta función le corresponde un vector axial con un adelanto de α_1 (en el sentido de rotación) sobre el vector axial correspondiente a $x = a \cos \omega t$; análogamente, a la función $x_2 = a_2 \cos(\omega t - \alpha_2)$, en la que se supone $\alpha_2 > 0$, le corresponde un vector axial con un retraso de α_2.

OBSERVACIÓN. Para calcular la diferencia de fases entre dos funciones sinusoidales, es conveniente expresar dichas fases en función del seno o del coseno.

EJEMPLO. Hallar la diferencia de fases entre la función $x = a \cos \omega t$ y su derivada $x' = -a\omega$ sen ωt; podrá escribirse

$$x' = -a\omega\cos\left(\frac{\pi}{2} - \omega t\right) = -a\omega\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = a\omega\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right),$$

lo que demuestra que el avance de fase de la derivada sobre la función es $\frac{\pi}{2}$. La demostración se haría en forma análoga cuando la función es de la forma $x = a$ sen ωt, o de manera más general de la forma $x = a\cos(\omega t \pm \alpha)$ o $x = a$ sen $(\omega t \pm \alpha)$; podrá, pues, enunciarse: *La derivada de una función sinusoidal es otra función sinusoidal del mismo período y con un cuarto de período de avance sobre la función.*

Suma de dos funciones periódicas del mismo período (composición de dos movimientos vibratorios simples). — Sean dos funciones sinusoidales del mimo período:

$$x_1 = a_1 \cos(\omega t + \alpha_1) \quad \text{y} \quad x_2 = a_2 \cos(\omega t + \alpha_2).$$

Sea la función $x = x_1 + x_2$ que es, evidentemente, una función periódica de igual período; demostremos que es sinusoidal; para ello, podrá escribirse

$x = [a_1 \cos \alpha_1 + a_2 \cos \alpha_2] \cos \omega t - [a_1 \text{ sen } \alpha_1 + a_2 \text{ sen } \alpha_2] \text{ sen } \omega t$;

demostremos que, si se escogen convenientemente las constantes a y α, la expresión anterior podrá identificarse con:

$$x = a \cos(\omega t + \alpha).$$

En efecto: $x = a \cos \alpha \cos \omega t - a \text{ sen } \alpha \text{ sen } \omega t$,

y escribamos: $\begin{cases} a \cos \alpha = a_1 \cos \alpha_1 + a_2 \cos \alpha_2, \\ a \text{ sen } \alpha = a_1 \text{ sen } \alpha_1 + a_2 \text{ sen } \alpha_2; \end{cases}$

de donde, al dividir miembro a miembro:

$$\text{tg}\,\alpha = \frac{a_1 \text{ sen } \alpha_1 + a_2 \text{ sen } \alpha_2}{a_1 \cos \alpha_1 + a_2 \cos \alpha_2},$$

lo que define α, y, elevando al cuadrado: $a^2 = \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1)$, lo que define a.

Construcción de Fresnel. Este resultado puede ponerse de manifiesto mediante consideraciones geométricas: consideremos el vector OM_1, de longitud a_1, que gira con una velocidad angular ω y que puede hacerse corresponder con x_1, es decir, cuya proyección es x_1 y, análogamente, el vector OM_2, que puede hacerse corresponder con x_2; la suma

$$x = x_1 + x_2$$

puede considerarse como la proyección del vector OM, resultante geométrica de los vectores OM_1 y OM_2, que forman entre sí (*fig.* 191) un ángulo constante igual a la diferencia de las fases: $\alpha_2 - \alpha_1$.

De ello se deduce inmediatamente, proyectando sobre el eje de las x y sobre el eje de las y $\begin{cases} a \cos \alpha = a_1 \cos \alpha_1 + a_2 \cos \alpha_2 \\ a \text{ sen } \alpha = a_1 \text{ sen } \alpha_1 + a_2 \text{ sen } \alpha_2; \end{cases}$

por otra parte, en el triángulo OMM_2, se tiene la relación:

$$a^2 = a_1^2 + a_2^2 - 2a_1a_2 \cos \widehat{OM_2M} = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1).$$













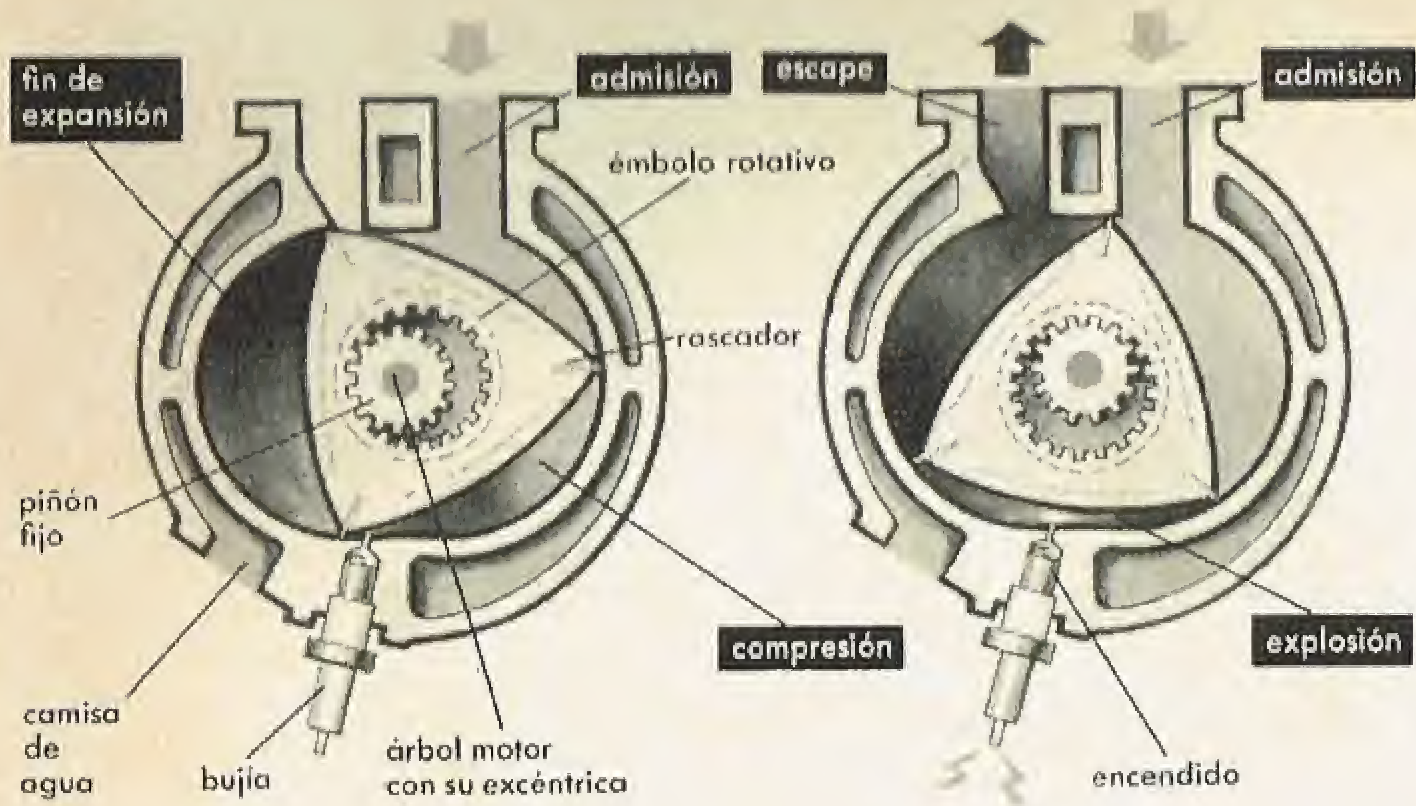


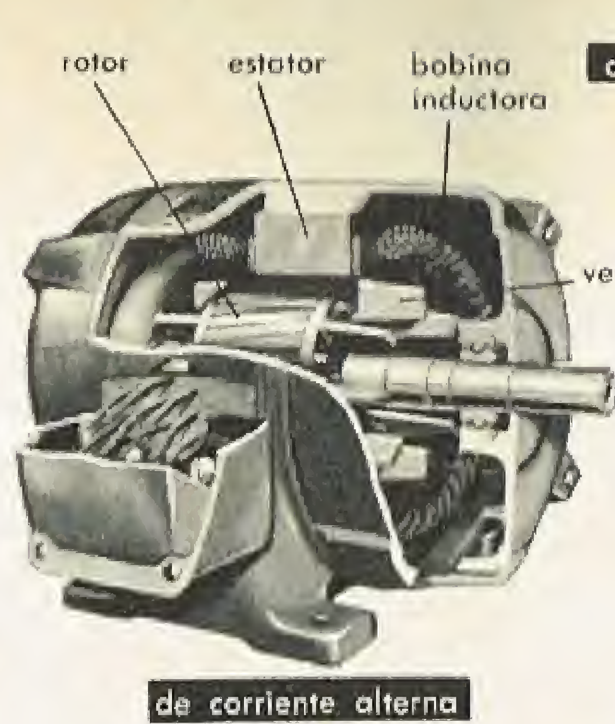


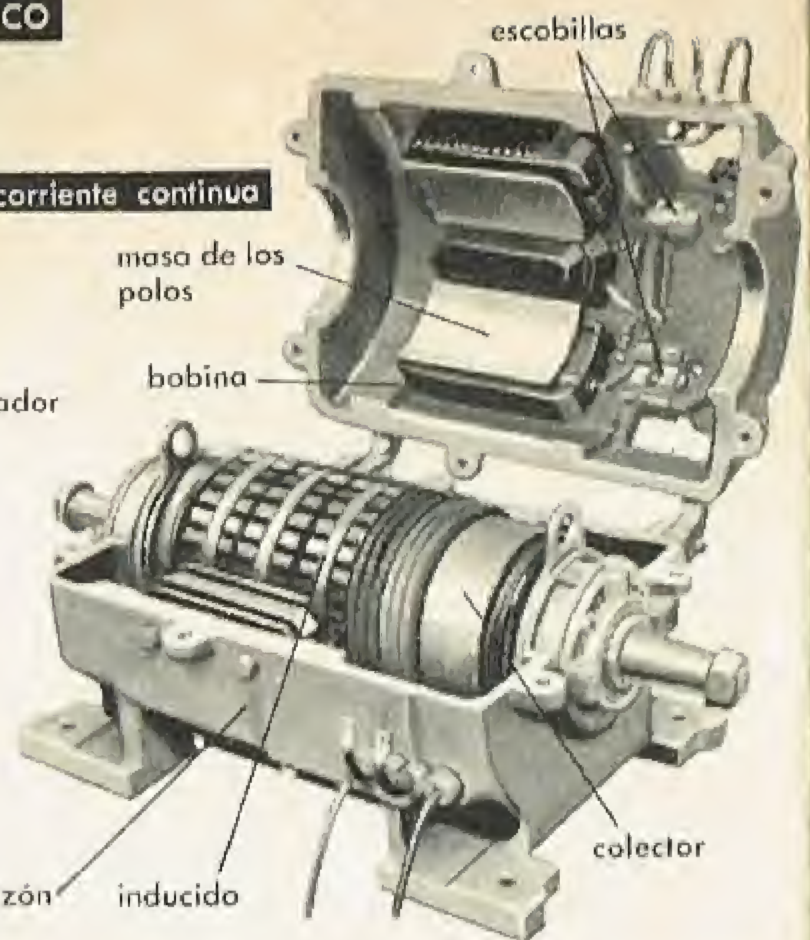
PRIMERAS UTILIZACIONES DE LOS MOTORES TÉRMICOS *Biblioteca Nacional, París*

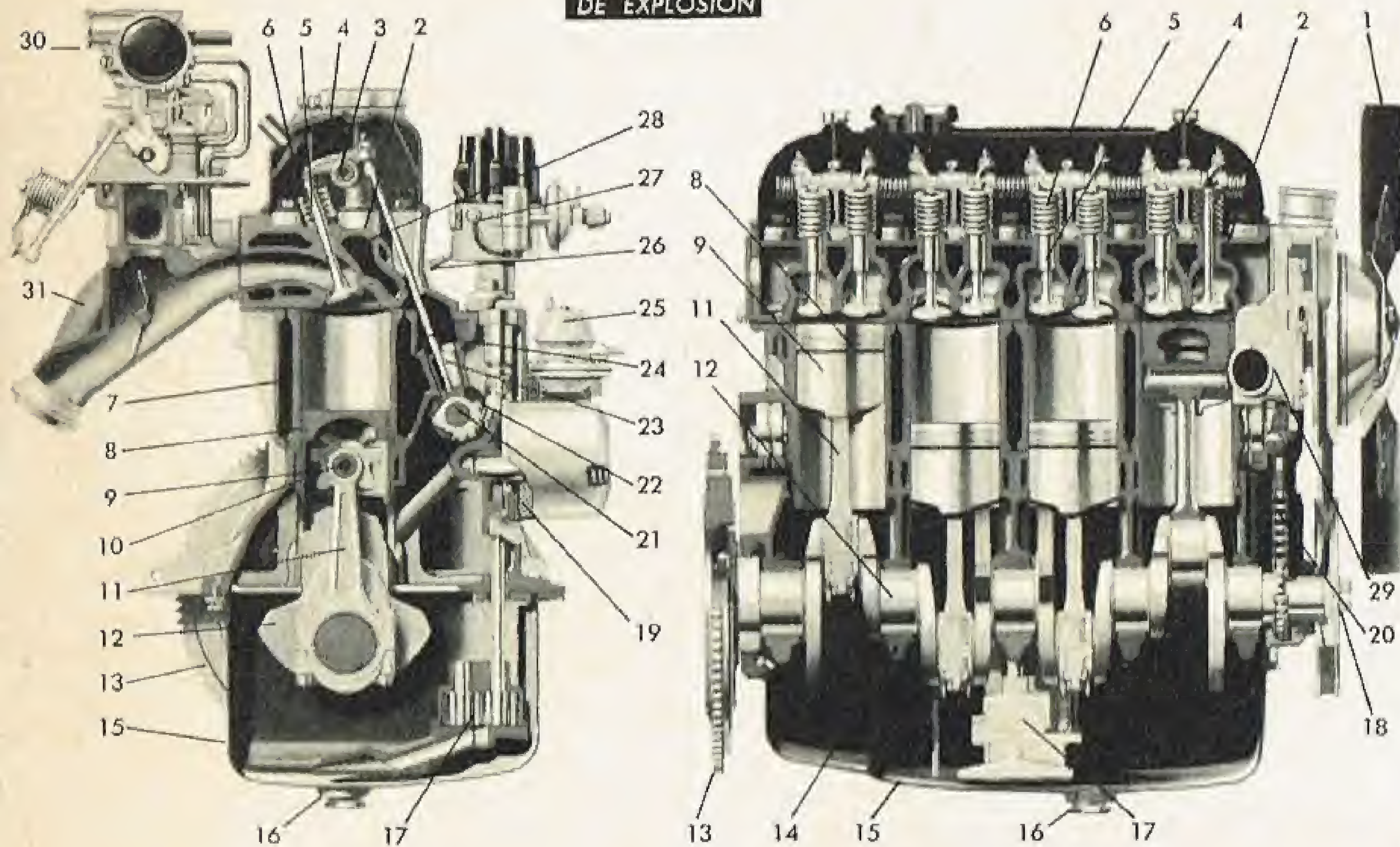
1. Barco de vapor (1840, Alemania); 2. Uno de los primeros automóviles De Dion-Bouton (hacia 1900), del que era proprietaria la famosa actriz conocida por la « Bella Otero »; 3. Carruaje inglés movido a vapor (1850); 4. Visión del mundo en 1942, dominado por los « carruajes a vapor » y los « caballos de vapor », según una ilustración alemana de alrededor de 1840; 5. « Carreta de vapor », imagen de 1850; 6. Estampa de Epinal (1848) que representa un ferrocarril; 7. Ferrocarril de Versalles a París (1850); 8. Ferrocarril hacia 1840, estampa alemana

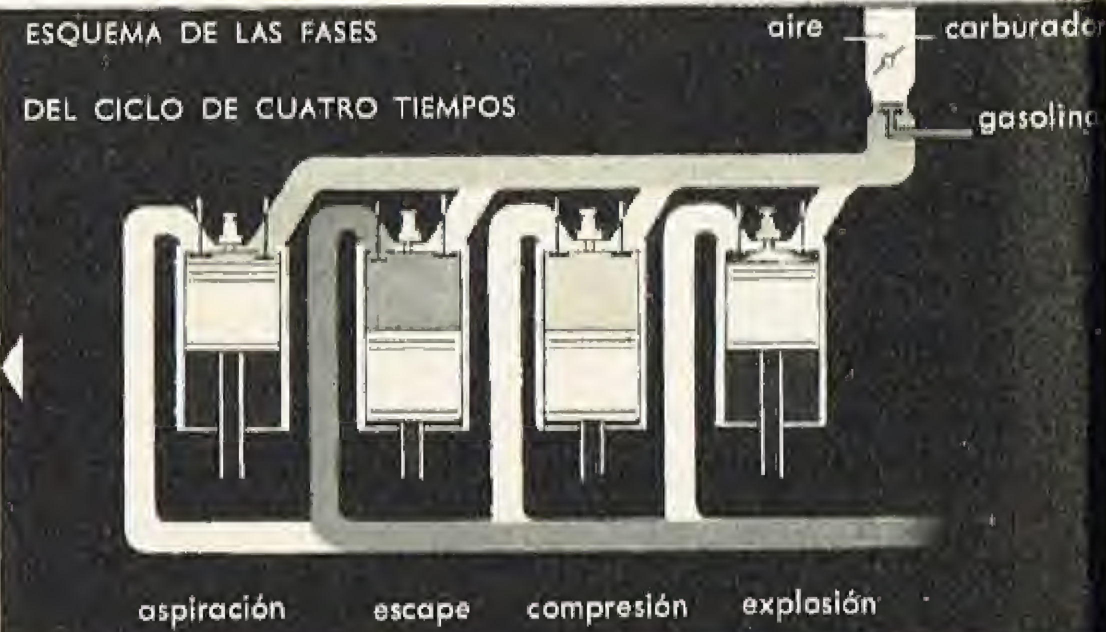
MOTOR

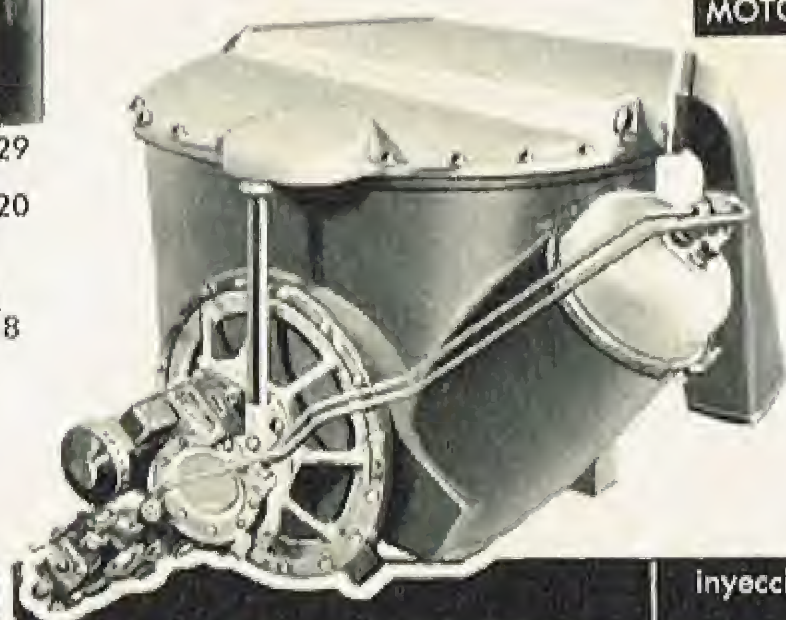






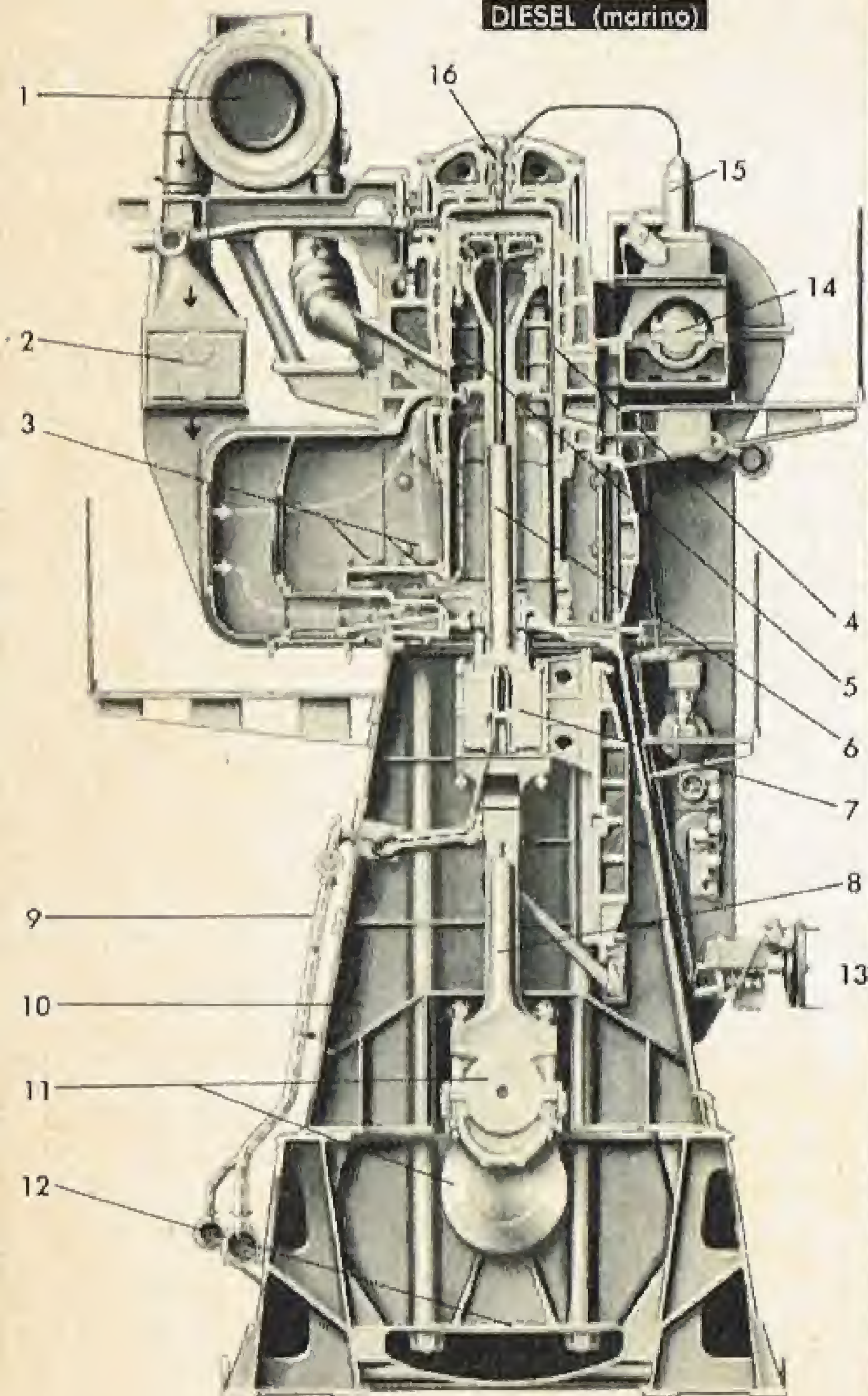




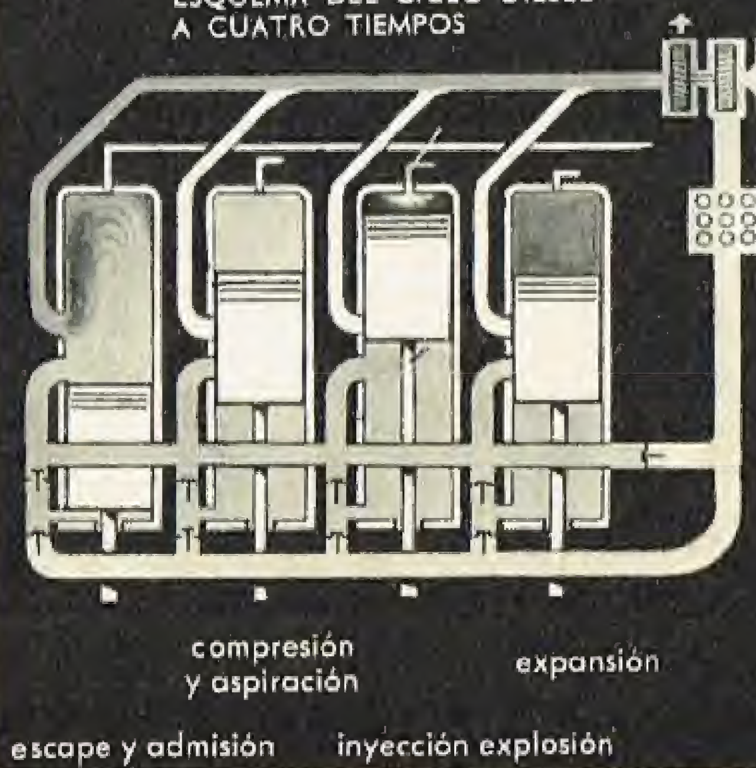


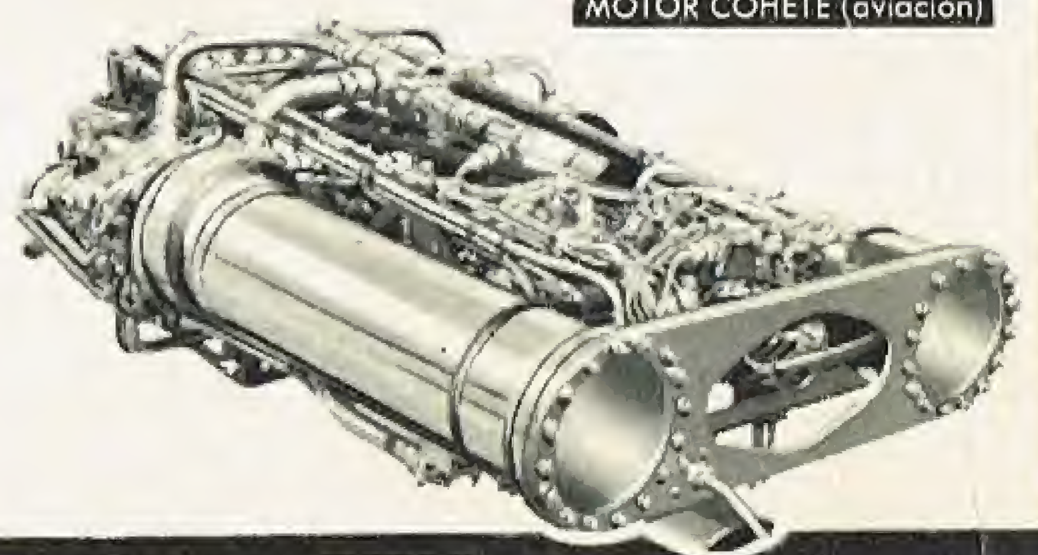
1. Ventilador; 2. Culata; 3. Eje del balancín; 4. Balancín; 5. Válvula; 6. Muelle de la válvula; 7. Bloque de cilindros; 8. Segmentos; 9. Émbolo; 10. Eje del émbolo; 11. Biela; 12. Cigüeñal; 13. Volante de embrague; 14. Palier; 15. Cárter de aceite; 16. Tapón de vaciado de aceite; 17. Bomba de aceite; 18. Enganche; 19. Filtro de aceite; 20. Piñón del árbol de levas; 21. Árbol de levas; 22. Mando del distribuidor de encendido; 23. Pulsador; 24. Varilla del pulsador; 25. Bomba de alimentación de combustible; 26. Bujía; 27. Distribuidor de encendido; 28. Camisa de agua; 29. Bomba de agua; 30. Carburador; 31. Escape

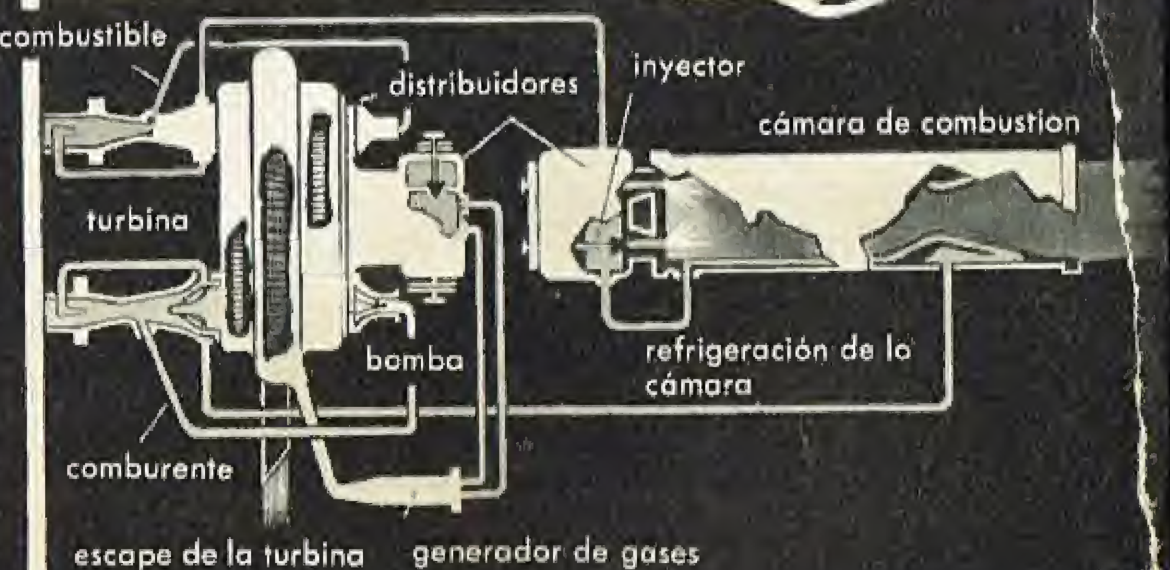




1. Turbosoplador de escape; 2. Refrigerante de aire de sobrealimentación; 3. Válvulas de aire de sobrealimentación y de barrido; 4. Cilindro; 5. Émbolo; 6. Vástago del émbolo; 7. Cabeza de émbolo; 8. Biela; 9. Entrada y salida del aceite de refrigeración; 10. Armazón; 11. Cigüeñal; 12. Plataforma del armazón; 13. Mando del régimen e inversión del sentido de rotación; 14. Árbol de levas; 15. Bomba de inyección; 16. Inyector







Esta construcción, debida a Fresnel, se generaliza inmediatamente a la suma de varias funciones sinusoidales: para obtener el vector axial correspondiente a tal suma basta construir el resultado geométrico de los vectores axiales que corresponden a los diferentes términos de esta suma.

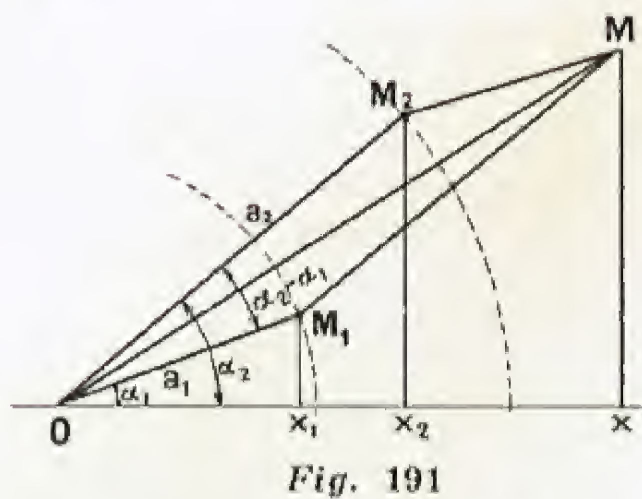


Fig. 191

Suma de funciones sinusoidales de períodos muy próximos: batimientos. — Consideremos dos funciones sinusoidales: $x_1 = a_1 \cos \omega_1 t$, y $x_2 = a_2 \cos \omega^2 t$, de períodos aproximados T_1 y T_2; cuando $t = 0$, las dos funciones son máximas; si estas dos funciones representan, por ejemplo, los movimientos de dos péndulos, se dice que para $t = 0$ ambos péndulos están en coincidencia; al transcurrir el tiempo, el péndulo de menor período (supongamos $T_2 < T_1$) se va adelantando poco a poco, y se producirá una nueva coincidencia cuando este péndulo haya efectuado una oscilación más que el otro, es decir, al cabo de un tiempo T, tal como

$$T = nT_1 = (n + 1)T_2.$$

La función $x = x_1 + x_2$ presenta un máximo a cada coincidencia de ambos péndulos; la periodicidad con que se producen los máximos sucesivos se caracteriza, pues, por el período T o por la frecuencia $N = \frac{1}{T}$, fácil de calcular.

De $nT_1 = (n + 1)T_2$, se obtiene $n = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$,

de donde $T = nT_1 = \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2}$,

$$\frac{1}{T} = N = \frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2} = \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} = N_2 - N.$$

Resultado importante, que puede enunciarse de la forma siguiente:

La frecuencia de los máximos sucesivos de la suma de dos funciones sinusoidales de períodos próximos es igual a la diferencia entre las frecuencias de ambas funciones.

Este resultado se utilizará en acústica para explicar el fenómeno de "batimientos" que se produce cuando dos sonidos de alturas parecidas son emitidos simultáneamente.

Funciones periódicas amortiguadas

Consideremos una función de la forma $x = a \cos \omega t$, donde a es una función del tiempo, constantemente decreciente; la función x presenta una serie de máximos sucesivos separados entre sí por intervalos $T = \frac{2\pi}{\omega}$; estos máximos van disminuyendo regularmente, y la curva que representa las variaciones de x es análoga a la que se representa en la figura 192; la amplitud de las oscilaciones va decreciendo constantemente y la función se denomina "amortiguada" y presenta un pseudoperíodo igual a T.

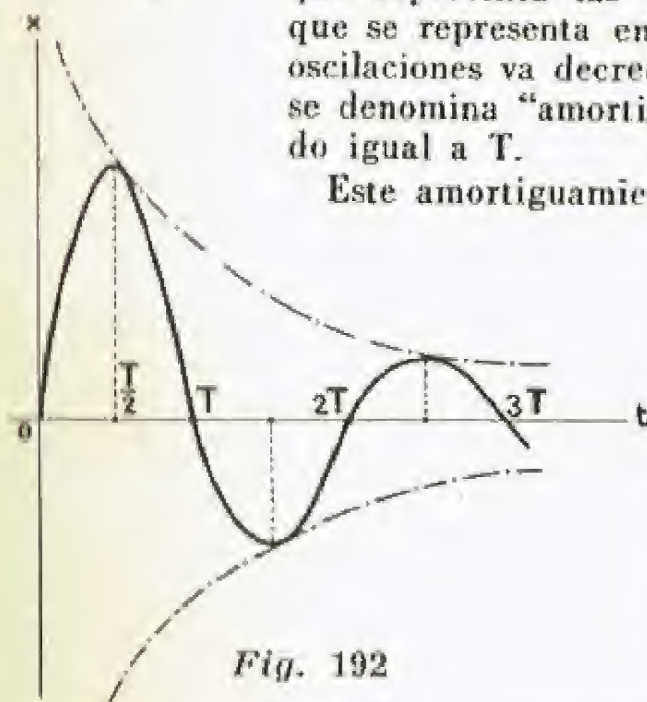


Fig. 192

Este amortiguamiento de las oscilaciones se produce, en gran número de movimientos vibratorios, por efecto de rozamientos o en los fenómenos de propagación del movimiento vibratorio de una fuente en un medio elástico; en particular, este amortiguamiento explica la disminución de la intensidad de un sonido a medida que nos alejamos de la fuente sonora.

Propagación de un movimiento vibratorio. — Consideremos (*fig.* 193) un medio elástico constituido por una serie de puntos materiales A, B, C, ..., cuyas posiciones de equilibrio son A_0, B_0, C_0, ... Deformemos este medio trasladando el punto A desde A_0 a A_1. Se crea entonces una fuerza de recuperación que tiende a trasladar B de B_0 a B_1, de tal forma que $A_1B_1 = A_0B_0$. Si B se traslada a B_1, se crea una fuerza de recuperación que tiende a llevar C desde C_0 a C_1, de forma que $B_1C_1 = B_0C_0$, ..., etc.

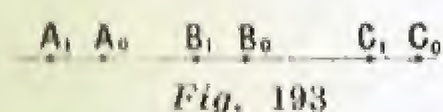


Fig. 193

Para restablecer las distancias relativas de equilibrio, todos los puntos del medio han sufrido desplazamientos iguales $A_0A_1 = B_0B_1 = C_0C_1 = \ldots$: se dice entonces que la deformación que se ha producido en A_0 se ha "propagado". Como ejemplo práctico del medio elástico que acaba de imaginarse puede citarse los vagones de un tren con los muelles de enganche: al desplazarse el primer vagón cuando se engancha la locomotora, comprime el muelle entre el primero y el segundo vagón, creándose una fuerza elástica que repele este segundo vagón, y así sucesivamente.

Velocidad de propagación. — Es necesario cierto tiempo para que un punto M de un medio elástico, situado a una distancia l del punto A_0, reproduzca el desplazamiento del punto A; este tiempo es proporcional a la distancia l, lo que es evidente si el medio elástico es homogéneo; podrá, pues, escribirse $\frac{l}{t} = V$; V representa una constante que se denomina, por definición, "velocidad de propagación" de la deformación de un medio elástico.

Puede hacerse la experiencia en el laboratorio con una cuerda larga de goma o con un muelle largo: al deformarse la cuerda en un punto o al desplazarse una espina del muelle, puede observarse cómo se propaga la deformación sucesivamente (*fig.* 194).

La velocidad de propagación es independiente de la magnitud de la deformación.

Para establecer experimentalmente esta propiedad, muy importante, basta con producir sucesivamente dos deformaciones de magnitudes diferentes en un punto de la cuerda de goma: se ve entonces cómo se propagan ambas deformaciones a lo largo de la cuerda conservando entre sí el mismo intervalo.

Punto fuente. Longitud de onda. — Se denomina "punto-fuente" o simplemente "fuente" el primer punto que se separa de su posición de equilibrio.

Si este desplazamiento es pequeño, la fuerza de recuperación que actúa sobre la fuente es proporcional al desplazamiento, de forma que si se le abandona a sí mismo toma un movimiento oscilatorio sinusoidal alrededor de su posición de equilibrio. Puede considerarse cada elongación de la fuente como un desplazamiento con respecto a su posición de equilibrio; según lo anterior, cada punto del medio reproducirá estos mismos desplazamientos; es decir, se verá animado por un movimiento oscilatorio del mismo período alrededor de su posición de equilibrio, diciéndose entonces que se ha producido una "propagación del movimiento vibratorio".

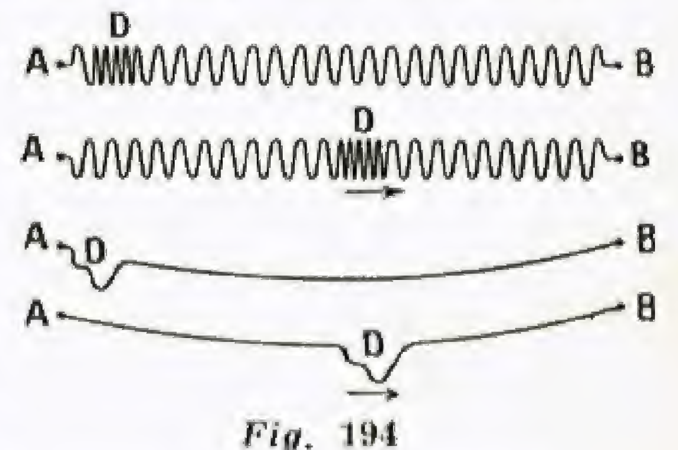


Fig. 194

Esta propagación se hace, como ya se ha visto, con un movimiento uniforme de velocidad V.

Se denomina *longitud de onda* la distancia $\lambda = V\,T$ a la cual se propaga la deformación durante un período T de la fuente.

Vibraciones transversales. Vibraciones longitudinales. — Una vibración se denomina "transversal" cuando es perpendicular a la dirección de propagación (por ej.: vibraciones de una cuerda, perpendiculares a su dirección).

Se denomina vibración "longitudinal" la que se produce según la dirección de su propagación (ej.: vibraciones de las espiras de un muelle).

Vibraciones transversales. — Problema fundamental: sea $s = s_0 \operatorname{sen} \omega t$ la elongación de la fuente S, en el instante t, con respecto a su posición de equilibrio S_0; el problema es determinar la elongación y de un punto cualquiera M del medio, que se encuentra en el mismo instante a la distancia x de la fuente.

Basta con observar que la elongación de M, en el instante t, es igual a la elongación de la fuente S, en el instante $t - \frac{x}{V}$, puesto que para que la deformación se transmita a M ha sido necesario que transcurra un tiempo $\frac{x}{V}$; la elongación de M en el instante t será, pues,

$$y = s_0 \operatorname{sen} \omega \left(t - \frac{x}{V}\right).$$

Teniendo en cuenta que $\omega \frac{2\pi}{T}$, puede escribirse

$$y = s_0 \operatorname{sen} 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{VT}\right), \quad \text{o} \quad y = s_0 \operatorname{sen} 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right).$$

Del examen de esta ecuación se deducen cierto número de propiedades fundamentales:

1º Consideremos que en esta ecuación x es conocida y t variable, es decir, consideremos lo que ocurre al transcurrir el tiempo en un punto M determinado cuya posición de equilibrio está situada a la distancia x de la fuente; se observará que este punto está animado de un movimiento vibratorio del mismo período y de la misma amplitud que la fuente, pero con retraso de fase igual a $2\pi \frac{x}{\lambda}$;

2º Si consideramos ahora que t es conocida y x variable, lo que equivale a examinar el conjunto de la cuerda en un instante dado, por ejemplo, a fotografiarla, esta ecuación, que relaciona la elongación y (es decir, la ordenada de los diferentes puntos de la cuerda) con su distancia x a la fuente (es decir, a sus abscisas), no es más que la ecuación del lugar geométrico formado, en el momento considerado, por los diferentes puntos de la cuerda; por consiguiente, es la propia ecuación de la cuerda en el instante t.

La forma de la ecuación muestra que, en cada instante, la cuerda es una sinusoide.

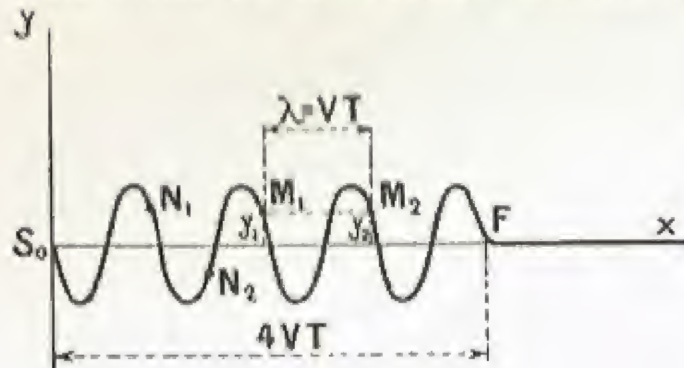


Fig. 195

La figura 195 representa la forma de la cuerda en el instante $t = 4T$; en este instante, la fuente puntual ha vuelto a su posición de equilibrio S_0, después de haber efectuado cuatro oscilaciones completas; el punto F, que se encuentra a una distancia $SF = 4\ VT$, permanece todavía en reposo, y va a empezar a entrar en vibración; constituye lo que se denomina el "frente de onda", que se desplaza con la velocidad de propagación V.

Conviene observar que en este instante, y también en cualquier instante, todo par de puntos M_1, M_2, cuyas posiciones de equilibrio se encuentran a una distancia mutua $\lambda = VT$ o $k\lambda$ (en donde k es un número entero), tiene las mismas elongaciones $y_1 = y_2$; ello es debido a que, para estos puntos, la diferencia $x_2 - x_1 = k\lambda$ y, por consiguiente, la diferencia de las fases es $2k\lambda$. Análogamente, todo par de puntos N_1, N_2, cuyas posiciones de equilibrio se encuentran a una distancia $\frac{\lambda}{2}$ o, más generalmente $(2k + 1)\frac{1}{2}$, presenta a cada instante una diferencia de fases igual a π o a $(2k + 1)\pi$ y, por consiguiente, elongaciones iguales y de sentido contrario.

Si la fuente puntual efectúa sólo un número limitado n de oscilaciones, la sinusoide se extiende solamente a un número limitado n de longitudes de onda: constituye lo que se denomina un "tren de ondas".

Si la fuente puntual efectúa un número indefinido de oscilaciones, la sinusoide es sostenida a partir de la fuente y constituye una "onda".

Propagación de la onda. — Consideremos las ecuaciones de la onda en un instante t_1 y en un instante posterior t_2; estas ecuaciones son

$$y = s_0 \operatorname{sen} 2\pi\left(\frac{t_1}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) \quad \text{e} \quad y = s_0 \operatorname{sen} 2\pi\left(\frac{t_2}{T} - \frac{x}{\lambda}\right);$$

esta segunda ecuación puede escribirse

$$y = s_0 \operatorname{sen} 2\pi\left(\frac{t_1}{T} - \frac{x - V(t_2 - t_1)}{VT}\right);$$

bajo esta forma, se observa que la elongación y, en el instante t_2, de un punto situado a la distancia x de la fuente es la misma, en el instante t_1, que la de un punto situado a una distancia $x - V(t_2 - t_1)$; por consiguiente, la onda, en el instante t_2, es la misma onda que en el instante t_1, desplazada, en el sentido de la propagación, una longitud $V(t_2 - t_1)$; este resultado se expresa diciendo que la onda se propaga con una velocidad V.

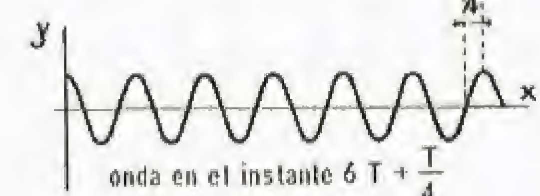


Fig. 196

Para determinar la forma del medio en un instante cualquiera t, es cómodo frecuentemente construir sobre una banda de papel de calcar la forma de la onda en un instante anterior determinado t_0, y después trasladar esta banda de papel, en el sentido de la prolongación, una longitud igual a $V(t - t_0)$; este procedimiento no hace más que materializar la propagación de la onda.

Ejemplo: En la figura 196 se ha trazado, en la parte superior, la forma de la onda en un instante $t_0 = nT$ (n, número entero), y en la parte inferior la onda en el instante $t = nT + \frac{T}{4}$); se observará, después de haber calcado la primera, que para obtener la segunda basta trasladar el calco $\frac{\lambda}{4}$ en el sentido de la propagación.

Lo que acaba de decirse se aplica a las ondas longitudinales; no obstante, las elongaciones y ya no son perpendiculares a la dirección de propagación, sino que se producen siguiendo esta dirección; la ecuación general $y = s_0 \operatorname{sen} 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$ permite determinar en cada instante la elongación y de un punto del medio cuya posición de equilibrio está a una distancia x de la fuente, pero esta ecuación ya no representa la forma del medio.

En las cuestiones relativas a las oscilaciones longitudinales suele ser cómodo suponer en principio que las oscilaciones son transversales y construir, con arreglo a esta hipótesis, la curva que representa la onda en el instante considerado. Esta construcción equivale a llevar sobre la ordenada de cada punto del medio la elongación, que se encuentra, en realidad, en el eje de abscisas a una u otra parte de la posición de equilibrio del punto; no debe olvidarse tener en cuenta el signo de las elongaciones, haciendo que el sentido positivo de las ordenadas corresponda al sentido positivo de las elongaciones que se producen según el eje de abscisas.

Ejemplo. Sea un punto M del medio cuya posición se quiere determinar en el instante $t = 4T$, y cuya posición de equilibrio M_0 está situada a una distancia x de la fuente animada de un movimiento oscilatorio longitudinal; construyamos primeramente (*fig.* 197) la forma de la

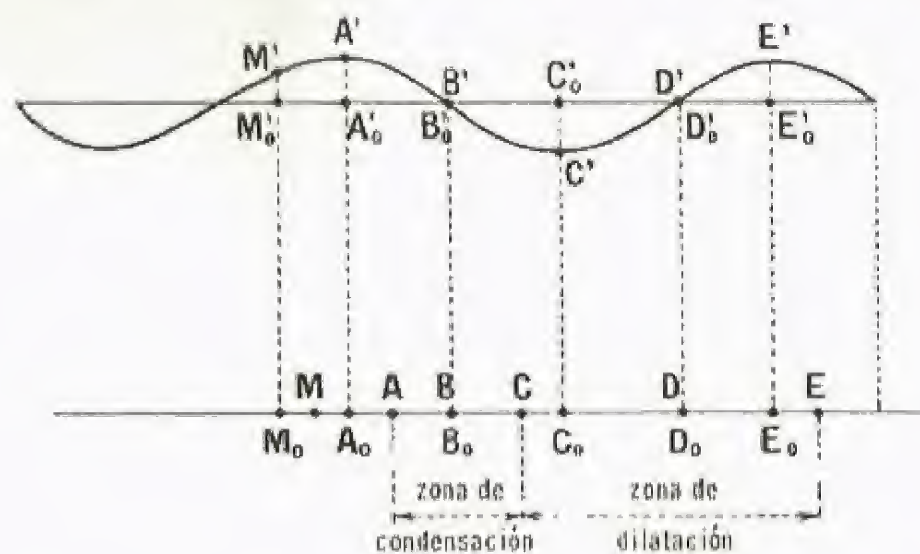


Fig. 197

onda suponiendo las oscilaciones transversales y conviniendo que las elongaciones llevadas sobre las ordenadas positivas corresponden a elongaciones longitudinales contadas positivamente en el sentido de la propagación; la posición del punto M se obtiene primeramente llevando $M_0M = M'_0M'$ en el sentido positivo.

Condensación. Dilatación. — En la figura se representan, utilizando el mismo procedimiento, es decir, llevando $A_0A = A'_0A'$, $B_0B = B'_0B' = 0$, $C_0C = C'_0C'$, $D_0D = D'_0D' = 0$, las posiciones, en el instante t, de los puntos del medio cuyas posiciones de equilibrio son, respectivamente A_0, B_0, C_0, D_0, ... Esta construcción pone de manifiesto un nuevo fenómeno característico de las oscilaciones longitudinales: vemos que la distancia AC es menor que A_0C_0; a causa de la propagación de la onda, ciertos puntos del medio se encuentran más próximos que en el estado de equilibrio; este estrechamiento se produce si $AC < A_0C_0$, es decir, $AC - A_0C_0 < 0$; este estrechamiento es tanto más importante, relativamente, cuanto mayor es la variación de distancia $AC - A_0C_0$, y cuanto menor es la distancia de equilibrio A_0C_0; por consiguiente, nos vemos obligados a considerar la cantidad $-\frac{AC - A_0C_0}{A_0C_0}$, que define lo que se denomina "condensación media" entre los puntos A_0 y C_0.

Más generalmente, si se consideran dos puntos, cuyas abscisas en las posiciones de equilibrio son respectivamente x_1 y x_2 y cuyas elongaciones en el instante t son y_1 e y_2, la condensación media entre estos dos puntos en el instante t se expresa por:

$$-\frac{[(x_2 + y_2) - (x_1 + y_1)] - (x_2 - x_1)}{x_2 - x_1} = -\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}.$$

Se denomina "condensación" en un punto M, el límite de la condensación media entre dos puntos M_1 y M_2, situados a una y otra parte de M, cuando los puntos M_1 y M_2 se aproximan indefinidamente a M, es decir, $\gamma = -\frac{dy}{dx}$; este valor de la condensación no es más que la derivada (cambiada de signo) de y con respecto a x, lo que da:

$$\gamma = 2\pi\frac{s_0}{\lambda}\cos 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right).$$

Cuando γ es positiva se produce, efectivamente, estrechamiento de los puntos del medio, es decir, una verdadera condensación; si γ es negativa, hay separación de los puntos del medio: una condensación negativa equivale a una "dilatación".

Si en la expresión de γ se consideran x fija y t variable, es decir, si se considera lo que sucede en un punto particular al transcurrir el tiempo, se ve que la condensación en un punto varía según una función sinusoidal del tiempo, de periodo igual que la fuente. De donde resulta que la condensación en un punto toma alternativamente valores positivos y negativos, es decir, que en un mismo punto se suceden alternativamente condensaciones y dilataciones. La fórmula muestra que la amplitud de estas condensaciones o dilataciones varía en razón inversa de la longitud de onda y, por consiguiente, en razón directa de la frecuencia de las oscilaciones de la fuente puntual.

Si en la expresión de γ se considera t como fija y x como variable, es decir, si se considera lo que ocurre en los diferentes puntos del medio en un instante dado, se ve que la condensación es una función sinusoidal de x, de periodicidad λ; la condensación o la dilatación en un instante dado son las mismas en todos los puntos cuyas distancias a la fuente difieren en una longitud de onda o en un número entero de longitud de onda; en dos puntos cuyas distancias a la fuente difieren en un número impar de semilongitudes de onda hay a cada instante una condensación y una dilatación de amplitudes iguales.

Líneas de onda; superficies de onda. — Consideremos ahora, en lugar de un medio elástico lineal, una superficie elástica, como la superficie de un líquido; si un punto S de esta superficie está animado de un movimiento sinusoidal, las oscilaciones se propagan en todas las direcciones a partir de la fuente puntual con la misma velocidad de propagación V; en un instante dado, todos los puntos que se encuentran a la misma distancia de la fuente tienen la misma elongación, constituyendo lo que se denomina una "línea de onda" circular, cuyas vibra-

ciones están constantemente en fase; el frente de onda lo constituye una circunferencia de centro S, cuyo radio se dilata a la velocidad V. Estas ondulaciones circulares se observan cuando se arroja una piedra al agua.

En el caso de un volumen elástico (por ejemplo, un gas), las oscilaciones de una fuente puntual se propagan en todas las direcciones; el frente de onda está constituido por una esfera cuyo radio se dilata con la velocidad V; las superficies de onda son esferas cuyo centro es la fuente puntual.

Si las oscilaciones son longitudinales (caso de los gases), los fenómenos de dilatación y de condensación corresponden respectivamente a depresiones y sobrepresiones locales. Volveremos a tratar de este fenómeno al estudiar los tubos sonoros.

Interferencias. — Sólo se ha estudiado hasta ahora el caso sencillo de una sola fuente puntual; cuando dos o varias fuentes puntuales están simultáneamente en acción, se producen fenómenos de gran interés, conocidos bajo el nombre de "fenómenos de interferencia". El enunciado siguiente explica los hechos experimentales.

Principio de la composición de pequeños movimientos. — *Cuando dos o más fuentes animadas de oscilaciones sinusoidales de "pequeñas amplitudes" actúan simultáneamente en un medio elástico, la elongación de un punto del medio es, en cada instante, la resultante geométrica de las elongaciones que tendría este punto si cada una de las fuentes actuara aisladamente.*

Ejemplo (*fig.* 198). Supongamos que un medio elástico está sometido a la acción de dos fuentes S_1 y S_2; sea M_0M_1 la elongación, en un instante t, de un punto M del medio, bajo la sola acción de la fuente S_1, y M_0M_2 la elongación que tendría este punto también bajo la única acción de la fuente S_2: la elongación del punto M bajo la acción de ambas fuentes S_1 y S_2, que actúan simultáneamente, será M_0M, resultante geométrica de los vectores M_0M_1 y M_0M_2.

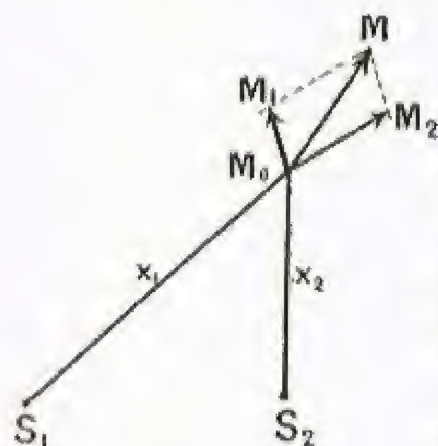


Fig. 198

Interferencias producidas por dos fuentes de igual período. — Supongamos además que las oscilaciones de las dos fuentes tienen direcciones paralelas; en este caso, la resultante geométrica equivale a una suma algebraica.

Sean $s_1 = a_1 \cos \omega t$ y $s_2 = a_2 \cos \omega t$ las ecuaciones del movimiento de las dos fuentes S_1 y S_2 (*fig.* 198), que para mayor sencillez suponemos que están en fase. La posición de equilibrio M_0 de un punto del medio es definida por las distancias $x_1 = S_1M_0$ y $x_2 = S_2M_0$. Si sólo existiera la fuente S_1, la elongación del punto M en el instante t sería

$$(1) \qquad y_1 = a_1 \cos \omega \left(t - \frac{x_1}{V} \right) ;$$

análogamente, si sólo existiera la fuente S_2, la elongación y_2 de M sería

$$(2) \qquad y_2 = a_2 \cos \omega \left(t - \frac{x_2}{V} \right) ;$$

cuando las dos fuentes actúan simultáneamente, la elongación del punto M es, de acuerdo con el principio de la composición de pequeños movimientos, la resultante geométrica (que se confunde en este caso con la suma algebraica) de las elongaciones; se tendrá, pues,

$$(3)\ y = y_1 + y_2 = a_1 \cos \omega \left(t - \frac{x_1}{v} \right) + a_2 \cos \omega \left(t - \frac{x_2}{v} \right) ;$$

la elongación y es, por consiguiente, la suma algebraica de dos funciones sinusoidales de igual período; este problema ya se ha estudiado, y se ha mostrado que cuando se tienen dos funciones sinusoidales del mismo período $y_1 = a_1 \cos (\omega t + \alpha_1)$ e $y_2 = a_2 \cos (\omega t + \alpha_2)$, la suma

$$y = y_1 + y_2$$

adopta la forma de una función sinusoidal de igual período:

$$y = a \cos (\omega t + \alpha) \text{ con } tg\, \alpha = \frac{a_1 \operatorname{sen} \alpha_1 + a_2 \operatorname{sen} \alpha_2}{a_1 \cos \alpha_1 + a_2 \cos \alpha_2}$$

y
$$a^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos (\alpha_2 - \alpha_1);$$

estas fórmulas dan la solución del problema, si se escribe

$$\alpha_1 = -\frac{\omega x_1}{V} \text{ o } \alpha_1 = -2\pi \frac{x_1}{\lambda} \text{ y } \alpha_2 = -\frac{\omega x_2}{V} \text{ o } \alpha_2 = -\frac{2\pi x_2}{\lambda},$$

de donde
$$tg\, \alpha = \frac{a_1 \operatorname{sen} 2\pi \frac{x_1}{\lambda} + a_2 \operatorname{sen} 2\pi \frac{x_2}{\lambda}}{a_1 \cos 2\pi \frac{x_1}{\lambda} + a_2 \cos 2\pi \frac{x_2}{\lambda}}$$

y
$$a_2^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos 2\pi \left(\frac{x_2 - x_1}{\lambda} \right).$$

Se deduce que cada punto M del medio está animado de un movimiento vibratorio de igual período que cada una de las fuentes, con una diferencia de fase que depende de x_1 y de x_2, es decir, de la posición del punto. La amplitud de las oscilaciones del punto M depende también de su posición; en particular, si la posición de M es tal como $\frac{x_2 - x_1}{\lambda} = 2k\pi$ o $x_2 - x_1 = k\lambda$ (k, número entero), la amplitud es máxima e igual a la suma de las amplitudes de las dos fuentes.

Para $k = 0$, se tiene $x_2 = x_1 = 0$; relación que se satisface para todos los puntos de la perpendicular o del plano perpendicular a S_1S_2 en su medio; para $k = 1$, la ecuación $x_2 - x_1 = \lambda$ define, en un plano que pasa por S_1S_2, una hipérbola de focos S_1 y S_2 (como se sabe, la hipérbola es el lugar geométrico de los puntos cuya diferencia de distancias a otros dos puntos fijos es constante); en el espacio, la ecuación $x_2 - x_1 = \lambda$ define un hiperboloide de revolución engendrado por la hipérbola anterior al girar alrededor de S_1S_2.

Según se considere un medio elástico plano o un volumen elástico, existirá, pues, una familia de hipérbolas o de hiperboloides sobre los cuales las oscilaciones resultantes de las dos fuentes tienen una amplitud máxima igual a la suma de las amplitudes de las dos fuentes.

Si la posición del punto M es tal como $\cos 2 \frac{x_2 - x_1}{\lambda} = -1$, lo que se verifica si $2\pi \frac{x_2 - x_1}{\lambda} = (2k + 1)\pi$ o si $x_2 - x_1 = 2(k + 1) \frac{\lambda}{2}$, la amplitud de las oscilaciones resultantes es mínima e igual a la diferencia de las amplitudes de las dos fuentes.

Un caso interesante es aquel en que las dos fuentes tienen la misma amplitud; en este caso, todos los puntos cuya diferencia de distancias a las dos fuentes es un número impar de semilongitudes de onda permanecen constantemente inmóviles, a causa de la interferencia de los pequeños movimientos que efectuarían estos puntos bajo la acción aislada de cada una de ambas fuentes.

Experiencia. Estas consecuencias, previstas por la teoría, pueden ponerse fácilmente en evidencia: se construyen, por ejemplo, dos fuentes del mismo período, de la misma amplitud y de la misma fase colocando en el extremo de una de las ramas de un diapasón una horquilla pequeña cuyas puntas S_1 y S_2 (*fig.* 199) golpeen la superficie de un baño de mercurio. Se observa en la superficie del baño cómo se dibujan hipérbolas cuyos focos son los dos puntos, mientras que si se coloca un flotador en M, entre las dos hipérbolas de amplitud máxima, no sufre ninguna oscilación.

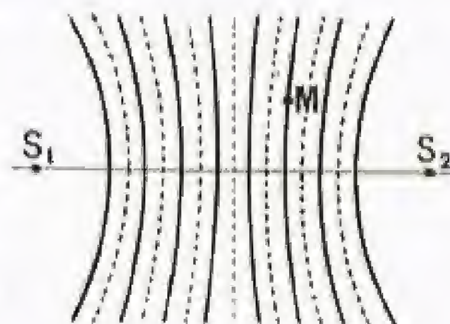


Fig. 199

Generalización. — Más adelante se verá que la producción de un sonido va ligada a un movimiento oscilatorio y que pueden producirse fenómenos de interferencia acústica cuando dos o más fuentes sonoras están simultáneamente en acción. También encontraremos en óptica fenómenos de interferencia luminosa (orificio de Young, espejos de Fresnel) debidos a la superposición de fenómenos vibratorios producidos por dos fuentes que actúan simultáneamente.

Antes de proseguir el estudio de los fenómenos vibratorios, indicaremos algunos procedimientos de estudio experimental que nos serán de utilidad en lo sucesivo.

Procedimientos de estudio de los movimientos vibratorios. — **Inscripción.** — Pueden utilizarse procedimientos de inscripción de los movimientos que sean en general demasiado rápidos para ser estudiados directamente.

Se fija, por ejemplo, a una de las ramas de un diapasón, un estilete que se apoya ligeramente sobre un cilindro cubierto de negro de humo y cuyo eje de rotación es perpendicular al plano de las ramas del diapasón; el estilete oscila entonces paralelamente al eje del cilindro y al ponerse éste en movimiento de rotación uniforme inscribe sobre el mismo una sinusoide que permite determinar el período del diapasón, si se conoce la velocidad de rotación del cilindro.

En lugar de una inscripción mecánica puede utilizarse una inscripción óptica: una rama del diapasón lleva un espejo que refleja un haz luminoso de dirección fija; las oscilaciones del diapasón desplazan el espejo y hacen girar el radio reflejado, que se recibe sobre una placa o sobre una película fotográfica animada de un movimiento de traslación uniforme. Este dispositivo permite una amplificación considerable de las oscilaciones.

En los "oscilógrafos", el espejo es solidario del cuadro de un galvanómetro y las variaciones de la intensidad de la corriente que atraviesa el cuadro producen rotaciones proporcionales a la intensidad de la corriente variable, que puede estudiarse mediante el "oscilograma" obtenido.

También puede emplearse un oscilógrafo catódico (v. pág. 151). Sobre las placas horizontales se aplica una tensión tal que los desplazamientos horizontales del punto luminoso sean proporcionales a los tiempos. El fenómeno vibratorio se transforma en diferencia de potencial alterna de las mismas características, utilizándose para el sonido un micrófono, por ejemplo, y se aplica esta diferencia de potencial a las placas verticales. Así se obtiene sobre la pantalla una curva que representa el fenómeno vibratorio. La gran ventaja de este aparato es su pequeña inercia, que permite estudiar fenómenos de frecuencia muy elevada.

Método estroboscópico. — Supongamos que un péndulo de período T oscila en una pieza completamente obscura: si se producen relámpagos instantáneos y periódicos del mismo período que el del péndulo, éste parecerá que permanece inmóvil, ya que cada iluminación le captará en la misma posición.

Si el período T de las iluminaciones es un poco más largo que el del péndulo, habrá efectuado algo más de una oscilación doble y, por consiguiente, se observará su movimiento, pero en forma muy retardada. Al contrario, cuando el período T es algo más corto, el péndulo parecerá oscilar lentamente y en sentido inverso al de sus oscilaciones verdaderas.

Un fenómeno de este tipo se produce en la cinematografía con las tomas de vistas instantáneas y periódicas cuando se registran fenómenos periódicos como el movimiento de una de las ruedas del automóvil; parece como si giraran a la inversa, cuando el intervalo de tiempo entre dos clisés es inferior al tiempo necesario para una vuelta de la rueda.

De una manera general, el método estroboscópico consiste en iluminar piezas animadas de un movimiento periódico, de manera periódica, por medio de relámpagos luminosos de corta duración cuya frecuencia es igual o aproximada a la del movimiento que se estudia.

Estos relámpagos pueden producirse de diferentes formas; una de las más sencillas consiste en interponer en el haz de un arco eléctrico un disco perforado con orificios equidistantes y accionados por un motor a velocidad uniforme y regulable. En el "estroborama" se utilizan las descargas instantáneas y periódicas de un condensador a través de un tubo de gas (neón) que el paso de la descarga ilumina.

Reflexión de las ondas. — En lo anterior, se ha supuesto que el medio elástico era indefinido y que la onda se propagaba libremente; en la práctica, esto sucede raramente, y la onda emitida por la fuente tropieza con un obstáculo que limita el medio elástico.

Reflexión de la propagación de un movimiento sobre un extremo fijo. — Consideremos una cuerda de goma de la que uno de los extremos se sostiene con la mano y el otro se fija en un punto O de un muro, y demos en S una sacudida a la cuerda: se comprueba que la deformación producida, como ya se ha observado, se propaga hacia la pared con una velocidad uniforme V. En la figura 200 se ha representado la deformación en D, en el momento en que acaba de producirse; un instante después, en D′, cuando el frente de la deformación llega a M, y, por último, en D″, cuando la deformación llega al obstáculo.



Fig. 200

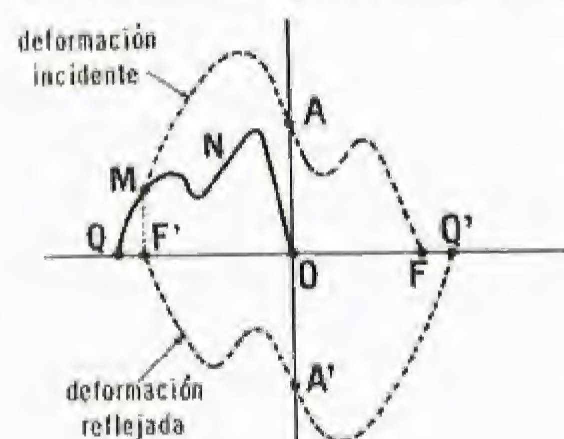


Fig. 201

La experiencia muestra que al entrar en contacto la deformación incidente con el obstáculo, se origina una deformación llamada "reflejada", deformación que se desplaza desde O hacia S con la misma velocidad que la deformación incidente. Esta deformación es tal que se la puede considerar como producida por una fuente S′, simétrica de S con respecto a O, y en oposición de fase.

Si prestamos atención a lo que ocurre en el momento en que la deformación incidente ha alcanzado ya el obstáculo (*fig.* 201) y cuando la deformación reflejada ha comenzado a formarse y a regresar, hay composición de movimientos para todos los puntos siutados entre O y F′; la forma real del medio está representada por la curva QMNO, cuyas ordenadas son las diferencias entre las ordenadas de la deformación incidente QAF y la deformación reflejada Q′A′F′; la rama A′F′ es simétrica de AF con respecto al punto O, y cuando el punto Q de la deformación incidente ha alcanzado el obstáculo, la deformación reflejada se propaga sin deformación.

Si la fuente puntual envía una onda o un tren de ondas sinusoidales, el resultado es análogo y el fenómeno se desarrolla como si existiera una fuente S′ simétrica de S con respecto al punto fijo O, y que efectúa el mismo movimiento en oposición de fase.

Reflexión de la propagación de un movimiento sobre un extremo libre. — Si vuelve a efectuarse la experiencia con una cuerda vertical, uno de cuyos extremos está libre, la deformación producida por la fuente puntual se propaga hacia abajo, reflejándose en el extremo libre y volviendo a subir con la misma velocidad. Esta propagación reflejada se puede considerar como producida por una fuente S′ simétrica de S con respecto al extremo libre de la cuerda y cuyos movimientos estén en fase con los de S.

Ondas estacionarias. — Supongamos que la fuente puntual efectúa una serie indefinida de oscilaciones sinusoidales; en cada punto de la cuerda se produce una composición de las elongaciones de la onda incidente y de la onda reflejada. Consideremos por el momento la composición de estos dos únicos movimientos.

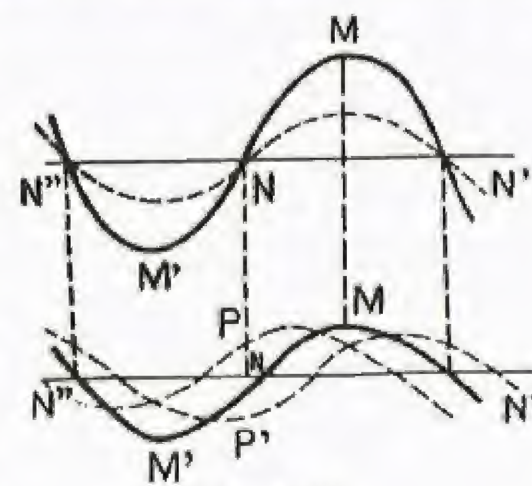


Fig. 202

Sea una porción de la cuerda que bajo el efecto de la vibración incidente adoptara la forma de una sinusoide que se desplaza en un sentido. Bajo el efecto de la vibración reflejada, adoptaría la forma de una sinusoide idéntica, y se desplazaría con la misma velocidad en el otro sentido. Supongamos que en el instante t se confunden estas dos sinusoides (*fig.* 202 [*parte superior*], línea de puntos). Las elongaciones de la cuerda son las sumas de las elongaciones de los dos sinusoides componentes (línea llena). En el instante $t + \Delta t$, las dos sinusoides se han desplazado una misma longitud $V\Delta T$ en cada sentido y el aspecto de la cuerda es el que muestra la figura 203 (*parte inferior*). NP = NP′, y por consiguiente el punto N conserva una elongación nula, como los puntos N′, N″ ... que se escalonan sobre la cuerda a una y otra parte de N, equidistantes de $\frac{\lambda}{2}$: son los "nodos de elongación". Los puntos M, M′ ... situados entre los puntos N, N′ N″ ... siguen teniendo la elongación más importante: son los "vientres de elongación". Se escalonan sobre la cuerda, equidistantes de $\frac{\lambda}{2}$, y estando cada uno de ellos situado a $\frac{\lambda}{4}$ de los dos nodos entre los cuales se hallan.

En realidad, la vibración reflejada, al llegar a la fuente puntual, se refleja de nuevo, recorre la cuerda en el sentido de la vibración incidente y después vuelve a reflejarse en el otro extremo, y así sucesivamente, produciéndose a cada reflexión cierta amortiguación. En un instante cualquiera, la cuerda está sometida no sólo a la vibración incidente y a la vibración reflejada, sino también a todas las vibraciones reflejadas sucesivas. Los efectos de todas estas ondas se suman en un punto y, en el caso general, sus efectos se destruyen más o menos completamente.

Consideremos el caso en que la vibración, después de dos reflexiones, está en fase con la vibración incidente. Sus efectos se añaden entonces a los efectos de esta vibración en un punto, sin duplicarlos, por la pequeña amortiguación que se produce. Al cabo de una tercera reflexión, entra en fase con la primera vibración reflejada y sus efectos se añaden también a los de esta última, y así sucesivamente. Entonces nos encontramos en el caso estudiado al principio del párrafo: composición de dos vibraciones idénticas que se propagan en sentido inverso, pero las elongaciones serán mucho mayores que las de la vibración incidente y la vibración reflejada. En particular, la amplitud de los centros de elongación será mucho mayor que la de la fuente, que puede, por consiguiente, considerarse como un nodo.

O M A

Fig. 203

A cada instante, la cuerda tiene la forma de una sinusoide, pero esta sinusoide no se desplaza a lo largo de la cuerda, y de ahí que se haya denominado este fenómeno "ondas estacionarias".

Consideremos de nuevo la condición de obtención de las ondas estacionarias. Es necesario para ello que la vibración, después de dos reflexiones, entre de nuevo en fase con la vibración incidente en M (*figura* 203). Su diferencia de marcha D tendrá que ser igual a un número entero de longitudes de ondas. Si suponemos el punto A fijo, la reflexión se hace con cambio de signo, lo que corresponde a un recorrido suplementario de $\frac{\lambda}{2}$. Lo mismo ocurrirá para la reflexión en O, fuente puntual. Se tiene

$$D = MA + \frac{\lambda}{2} + AO + \frac{\lambda}{2} + OM = k\lambda.$$

Si L es la longitud de la cuerda, se tendrá,

$$2L + \lambda = k\lambda, \qquad 2L = k'\lambda,$$

$$L = k' \frac{\lambda}{2}.$$

Por consiguiente, la longitud de la cuerda tendrá que ser igual a un número entero de semilongitudes de onda.

Sea N la frecuencia de la fuente puntual: $\lambda = \frac{V}{N}$,

$$L = \frac{k'V}{2N}.$$

Si la longitud de la cuerda es fija y la frecuencia N variable, se pro-

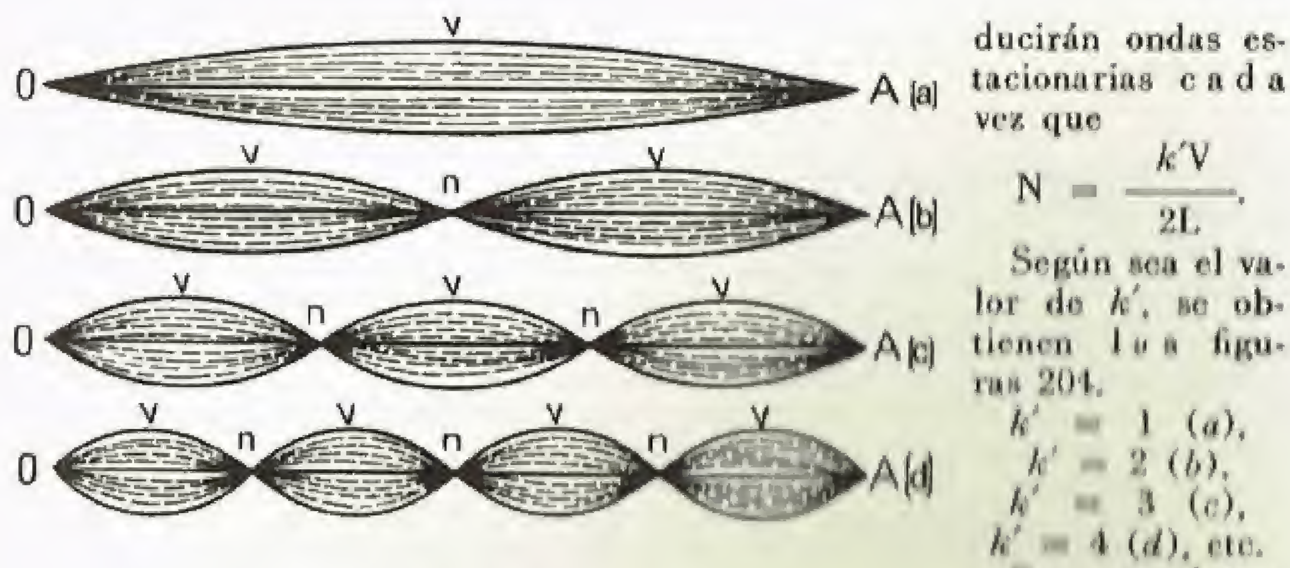


Fig. 204

ducirán ondas estacionarias cada vez que

$$N = \frac{k'V}{2L}.$$

Según sea el valor de k', se obtienen las figuras 204.

$k' = 1$ (a),
$k' = 2$ (b),
$k' = 3$ (c),
$k' = 4$ (d), etc.

De esta forma puede modificarse V, actuando sobre la tensión de la cuerda (v. CUERDAS VIBRANTES, pág. 74).

Estudio analítico. — Consideremos, en primer lugar, el caso en que sólo hay una onda incidente y una onda reflejada.

La reflexión se produce en el punto A fijo. Si este punto no fuese fijo, la onda incidente procedente de la fuente le comunicaría una elongación que, escogiendo convenientemente el origen de tiempos, podría expresarse por

$$y_1 = a \operatorname{sen} 2\pi \frac{t}{T}.$$

Como A es fijo, será necesario que la onda reflejada y_2 tenga una elongación constantemente opuesta

$$y_2 - y_1 = a \operatorname{sen} 2\pi \frac{t}{T}.$$

Consideremos un punto M a una distancia x de A. En este punto, la elongación incidente es la que se encontrará en A en el instante $t + \frac{x}{V}$:

$$y_1 = a \operatorname{sen} 2\pi \left[\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}\right].$$

La elongación reflejada es la que se encontraba en el punto A en el instante $t - \frac{x}{V}$:

$$y_2 = -a \operatorname{sen} 2\pi \left[\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right].$$

El movimiento de M es, pues,

$$y = y_1 + y_2 = a\left[\operatorname{sen} 2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}\right) - \operatorname{sen} 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right],$$

$$y = 2a \operatorname{sen} 2\pi \frac{x}{\lambda} \times \cos 2\pi \frac{t}{T}.$$

El movimiento del punto M es, por consiguiente, sinusoidal, de período T igual al de la fuente. Su amplitud es

$$A = 2a \operatorname{sen} 2\pi \frac{x}{\lambda},$$

que sólo depende de la posición de M.

Hay puntos en la cuerda que están constantemente inmóviles: son aquellos para los cuales A = 0, es decir,

$$\operatorname{sen} 2\pi \frac{x}{\lambda} = 0, \qquad 2\pi \frac{x}{\lambda} = k\pi,$$

$$x = k \frac{\lambda}{2}.$$

A es uno de estos puntos, que equidistan entre sí $\frac{\lambda}{2}$. Son los *nodos de elongación*. Los demás puntos tienen movimientos sinusoidales de amplitud no nula: aquellos cuya amplitud es máxima se denominan *vientres de elongación*, y en ellos

$$\left|\operatorname{sen} 2\pi \frac{x}{\lambda}\right| = 1,$$

$$2\pi \frac{x}{\lambda} = (2k + 1) \frac{\pi}{2},$$

$$x = (2k + 1) \frac{\lambda}{4}.$$

Equidistan entre sí $\frac{\lambda}{2}$ y están situados en los puntos medios de los intervalos que separan dos nodos consecutivos.

En realidad no se tienen solamente estas dos ondas, sino que, con la condición anterior de que $L = k' \frac{\lambda}{2}$, se tienen dos ondas idénticas que se propagan en sentidos inversos y, por consiguiente, se calculan análogamente. La única diferencia es que a ya no representa la amplitud del movimiento de la fuente, sino una amplitud que puede ser mucho mayor, por la adición de las vibraciones después de varias reflexiones sucesivas.

Si la reflexión en A se produce en un extremo libre, no hay cambio de signo en A, $y_1 = y_2$, en M:

$$y = y_1 + y_2 = a\left[\operatorname{sen} 2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}\right) + \operatorname{sen} 2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}\right)\right]$$

$$y = 2a \cos 2\pi \frac{x}{\lambda} \operatorname{sen} 2\pi \frac{t}{T};$$

la amplitud del movimiento de M es $A = 2a \cos 2\pi \frac{x}{\lambda}$.

Se ve que los nodos anteriores se han convertido en vientres y recíprocamente. Como la reflexión en A se produce sin cambio de signo, y por lo tanto sin que aumente el trayecto $\frac{\lambda}{2}$, la condición de obtención de las ondas estacionarias es

$$L = (2k - 1) \frac{\lambda}{4}.$$

El cálculo analítico muestra, además, que en este movimiento todos los puntos de la cuerda están en fase, lo que justifica el nombre de ondas estacionarias.

Caso de las ondas longitudinales. — Los mismos fenómenos de ondas estacionarias pueden también observarse con las ondas longitudinales que se reflejan sobre un obstáculo fijo. Un ejemplo de ello lo constituye, en acústica, el estudio de los tubos cerrados.

En el caso de las ondas longitudinales, a los fenómenos de movimiento se superponen fenómenos de condensación y de dilatación, siendo fácil de establecer la siguiente propiedad fundamental: *los nodos de desplazamiento son vientres de condensación, y recíprocamente.*

Hagamos (*fig.* 205) corresponder a las ondas longitudinales ondas transversales de la misma amplitud, y sean C_1 y C_2 las formas de la onda en dos instantes t_1 y t_2.

Valiéndose de esta correspondencia, que ya hemos tenido ocasión de establecer anteriormente, se ve que en el instante t_1 dos puntos A y B,

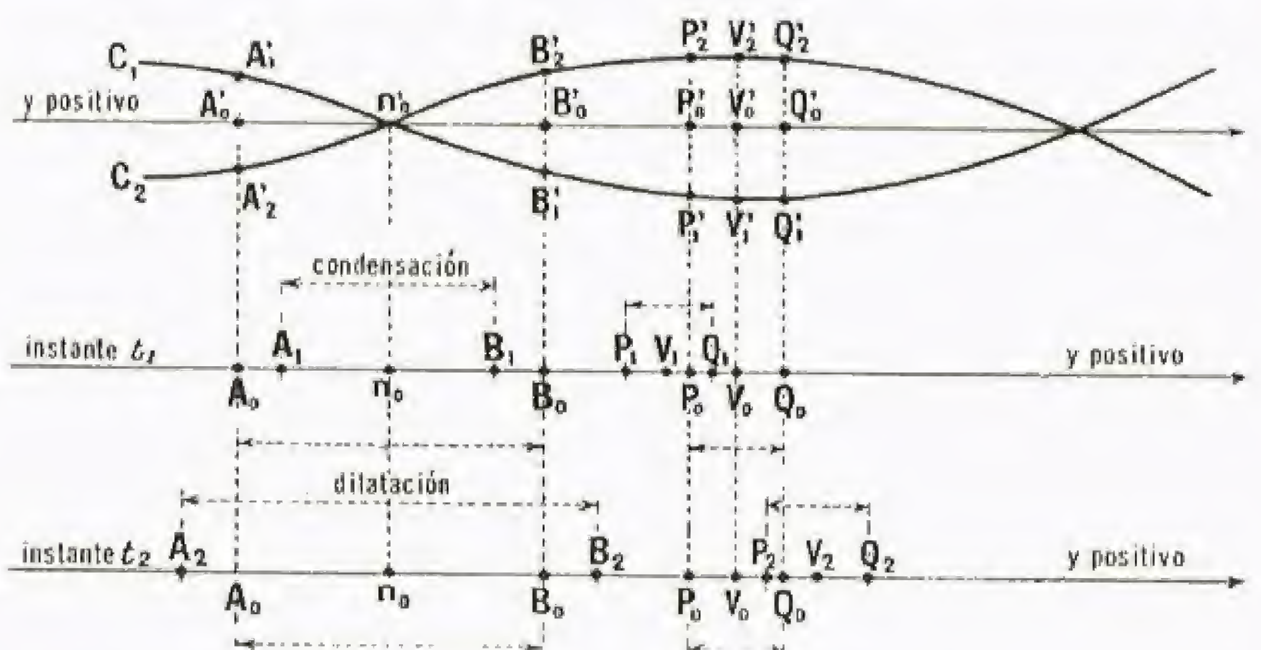
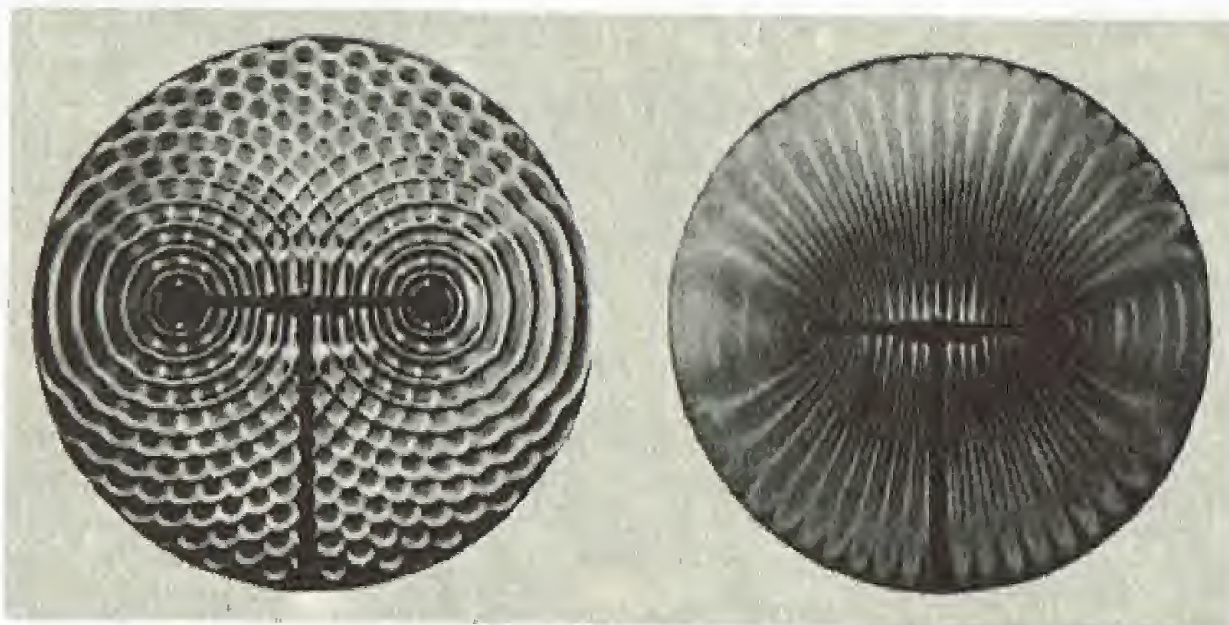


Fig. 205

situados a una y otra parte de un nodo n, se han colocado en A_1 y B_1, respectivamente, que se obtienen llevando $A_0A_1 = A'_0A'_1$ y $B_0B_1 = B'_0B'_1$, y cuidando de que los sentidos positivos de las elongaciones longitudinales y transversales se correspondan; análogamente, en el instante t_2 los puntos A y B se sitúan en A_2 y B_2. Obsérvese cómo los puntos situados a una y otra parte de un nodo tienen elongaciones cuyos sentidos son constantemente contrarios y que, por consiguiente, hay condensación o dilatación, según que los puntos se aproximen o se alejen "simultáneamente" del nodo.

En la proximidad de un vientre, por el contrario, dos puntos A y B, situados a ambas partes del vientre, tienen en cada instante elongaciones del mismo signo que las del propio vientre: por consiguiente, se producirá un desplazamiento de conjunto del medio, sin condensación ni dilatación.

Al estudiar los tubos sonoros se tendrá ocasión de establecer estos resultados experimentalmente.



Interferencias de dos sistemas de ondas, producidas por dos puntos fijados al mismo brazo de un diapasón. A la derecha se ha suprimido el dispositivo estroboscópico, y se observan las ondas estacionarias, en forma de hipérbola, producidas por las interferencias de los dos sistemas de ondas

Acústica

Reseña histórica. Fenómenos fundamentales. Producción de los sonidos. Límites de las frecuencias sonoras. Propagación del sonido. Velocidad del sonido. Velocidad del sonido en el aire. Fórmula de Laplace. Velocidad del sonido en los líquidos y los sólidos. Ultrasonidos, infrasonidos. — **Cualidades fisiológicas del sonido:** Intensidad. Altura o frecuencia de un sonido. Desplazamientos relativos del observador y de la fuente; principio de Doppler-Fizeau. Timbre. Intervalos musicales. Escalas. Escala armónica. Armónicos. Sostenidos y bemoles. Escala temperada. — **Cuerdas vibrantes:** Sonómetros. Ley de las longitudes. Ley de las tensiones. Estudio teórico. Armónicos. Instrumentos de cuerda. — **Tubos sonoros:** Producción de vibraciones en los tubos. Leyes de los tubos sonoros rectilíneos, de sección uniforme y con embocadura de flauta. Tubos abiertos y tubos cerrados. Estado vibratorio de un tubo sonoro. Representación gráfica del estado vibratorio del gas dentro de un tubo. Fórmulas de los tubos sonoros. Variaciones de presión en los diferentes puntos de un tubo sonoro. Medida de la velocidad del sonido en los diferentes gases. Funciones respectivas del tubo y de la embocadura. Instrumentos de música que utilizan tubos. — **Resonancia:** Definición general. Resonancia acústica. Resonadores

Reseña histórica. — Las ideas de los filósofos de la Antigüedad sobre la acústica eran bastante acertadas. **Séneca** (2-66) enseñaba ya, en los comienzos de la era cristiana, que la producción de los sonidos y su propagación es posible gracias a la elasticidad del aire.

Se atribuye a **Pitágoras** la invención del *monocordio*, instrumento compuesto por una cuerda tensada entre dos clavijas fijas. Con una clavija móvil se podía inmovilizar cierto punto de la cuerda comprendido entre las dos clavijas fijas: si se colocaba la clavija en el punto medio, se producía la primera octava superior; si se colocaba en la cuarta parte, la parte más pequeña daba la segunda octava, y así sucesivamente. Pitágoras estudió después los demás intervalos, comparando las longitudes de la cuerda que producían los sonidos correspondientes. Los griegos conocían bastantes instrumentos musicales.

En el siglo VI las notas se representaban por las siete primeras letras del alfabeto. Hacia 1330 se abandonó este modo de representación de los sonidos, que fue substituido por caracteres musicales o notas.

Bacon y **Galileo** sentaron las bases de la acústica.

Gassendi explicó la agudeza y la gravedad de los sonidos por la frecuencia relativa de las vibraciones, y el **padre Mersenna** (1588-1648) determinó la relación que existe entre los números de vibraciones de las diversas notas de la escala.

Otto de Guericke demostró que el sonido no se propaga en el vacío. El padre Kircher explicó el fenómeno del eco. **J. Sauveur** (1653-1716) descubrió, en 1700, los nodos y los vientres de vibración, que **Chladni** (1756-1827) comprobó después sirviéndose de placas salpicadas de arena fina. **Newton** estableció la teoría matemática de la transmisión del sonido, fundada en la elasticidad de los medios, y que explica satisfactoriamente todos los hechos observados. **Taylor, Daniel Bernoulli** (1762), **Euler** y **d'Alembert** establecieron la teoría analítica de las cuerdas vibrantes.

En 1738, los miembros de la Academia de Ciencias de Francia midieron la velocidad del sonido, comprobando que es de 333 metros por segundo, a 0° C. El padre Mersenna (1657) y los académicos de Florencia habían intentado obtenerla anteriormente.

En el siglo XIX, se intentó medir la altura de los sonidos con la sirena de **Cagniard de La Tour** (1777-1859), la rueda de **Savart** (1791-1841), etc.

Sturm (1803-1855), **Colladon** (1802-1893), en 1827, y **Regnault** determinaron la velocidad de propagación del sonido en diversos medios. **Helmholtz** y **Koenig** (1832-1901) analizaron los sonidos complejos valiéndose de resonadores y explicaron el timbre de los sonidos y de la voz humana, que después ha llegado a registrarse (v. FONÓGRAFO, pág. 232) y a transmitirse (v. TELÉFONO, pág. 217), gracias a la transformación de los fenómenos mecánicos en fenómenos eléctricos.

Fenómenos fundamentales. — *Se denomina* **acústica** *la parte de la física que estudia los fenómenos que percibe el sentido del oído y que se denominan "ruidos" o "sonidos".*

Los ruidos corresponden a percepciones auditivas breves, o por lo menos discontinuas; los sonidos dan una sensación de continuidad, permaneciendo durante cierto tiempo idénticos a sí mismos, y les corresponde una sensación musical particular.

Producción de los sonidos. — Es fácil establecer experimentalmente el siguiente hecho fundamental: *el sonido es producido por un movimiento vibratorio.*

Si se aparta de su posición de equilibrio una cuerda (de violín, de piano), y después se suelta, entra en vibración, vibración que puede ponerse en evidencia por los métodos experimentales ya descritos (inscripción, estroboscopia); se ha producido un sonido. Los sonidos producidos por la voz son debidos a las vibraciones de las cuerdas vocales. Si se golpea un vidrio o una campana de cristal, también se produce un sonido; las vibraciones del vidrio pueden percibirse por la mano o manifestarse por los movimientos de un cuerpo ligero y duro colocado dentro de la campana (bola de acero).

Si bien todo sonido es producido por un movimiento vibratorio, la recíproca no es cierta, es decir, que pueden hacerse vibrar, por ejemplo, la dos varillas de unas pinzas, sin que se produzca un sonido.

Se ha demostrado que el sonido sólo puede percibirse cuando la frecuencia de las vibraciones está comprendida entre ciertos límites, que varían ligeramente de un individuo a otro.

Límites de las frecuencias sonoras. — Para que un sonido pueda percibirse, la frecuencia del movimiento vibratorio que lo produce debe estar comprendida entre 30 y 20 000 períodos por segundo. Los sonidos cuya frecuencia es inferior a 30 se denominan "infrasonidos", y los de frecuencia superior a 20 000, "ultrasonidos". Los infrasonidos y los ultrasonidos no son audibles, pero sus propiedades físicas son análogas a las de los sonidos.

Propagación del sonido. — La propagación del movimiento vibratorio de la fuente sólo puede realizarse cuando existen uno o varios medios elásticos interpuestos entre dicha fuente y el "tímpano", membrana elástica que obtura el oído.

El sonido, al contrario de la luz, no se propaga en el vacío, como puede demostrarse colocando dentro de una campana un diapasón o un timbre y haciéndolo vibrar eléctricamente. Si se ha obtenido un buen vacío en la campana, el sonido deja de percibirse.

En general, el medio elástico que existe entre la fuente vibrante y el pabellón auditivo es el aire, pero puede también reemplazarse por sólidos (si se aplica el oído al suelo de una carretera, por ejemplo, la carretera transmite los sonidos o los ruidos mejor que el aire) o por líquidos (los peces huyen cuando se hace ruido en la playa; los nadadores sumergidos oyen debajo del agua).

Velocidad del sonido. — La transmisión de un sonido desde la fuente que lo produce hasta el oído no es instantánea. Así, la llama que sale de la boca de un cañón se percibe antes de que se oiga el ruido que produce; los relámpagos se ven antes de oír el trueno. Existe, pues, cierta velocidad de propagación del movimiento vibratorio a través del medio interpuesto entre dicha fuente y el oído, que se denomina "velocidad del sonido" en el medio considerado. Si este medio es homogéneo, la velocidad del sonido es uniforme y las ondas se propagan a lo largo de esferas cuyo centro es la fuente.

Velocidad del sonido en el aire. — La velocidad de propagación en el aire de un movimiento vibratorio que se produzca en su seno, o de cualquier perturbación, es independiente de la naturaleza de dicha perturbación y de la frecuencia del movimiento vibratorio; así, la audición de una serie de sonidos muy próximos y muy diferentes, por ejemplo de una pieza musical, no se altera por la distancia, lo que demuestra que los intervalos de tiempo que separan la audición de los diferentes sonidos son los mismos que los de su emisión.

Para medir la velocidad del sonido puede, pues, utilizarse cualquier sonido, empleándose de preferencia una señal sonora muy breve: por ejemplo, un cañonazo.

El principio del método es el siguiente: a una distancia del cañón, que se mide exactamente, se coloca un cronómetro o un cuentasegundos, que se pone en marcha en el instante en que se percibe la llamarada que sale de su boca y se para en el momento en que se oye la detonación; si D es la distancia del observador al cañón y t el tiempo que tarda el sonido en llegar hasta él, la velocidad del sonido será $V = \frac{D}{t}$.

El tiempo que tarda la luz no se toma en cuenta, por ser extremadamente breve en las distancias a que se opera (unos cuantos kilómetros), ya que, como es sabido, la velocidad de la luz es muy elevada (300 000 kilómetros por segundo).

Las experiencias, efectuadas como acaba de explicarse, presentan errores debidos a que el observador no reacciona instantáneamente a la señal luminosa ni a la señal sonora para poner en marcha o parar el cuentasegundos. Para eliminar esta fuente de error basta con utilizar un método de inscripción: al producirse el golpe se desencadena un circuito eléctrico que provoca una inscripción en un cilindro registrador; la llegada del sonido actúa sobre una placa cuya sacudida rompe un contacto en un circuito eléctrico que determina la inscripción de la señal de llegada. Para calcular el tiempo transcurrido entre las dos señales se registran simultáneamente las vibraciones de un diapasón de período conocido.

Los resultados obtenidos para la velocidad del sonido en el aire dependen de la temperatura y, en cambio, son casi independientes de la presión. La velocidad del sonido aumenta con la temperatura, aproximadamente 60 cm/s por cada grado centesimal, y también depende del estado higrométrico del aire; debe procurarse realizar las experiencias cuando no haya viento, pudiendo introducirse una corrección que tenga en cuenta la velocidad y la dirección del viento, o bien eliminar esta causa de error enviando la señal sonora y recibiéndola con un intervalo de tiempo lo suficientemente corto para que pueda considerarse que durante el mismo no ha variado la velocidad del viento, tomando entonces el promedio de las dos medidas.

Resultados: La velocidad del sonido en el aire seco y a 0° C es

$$V_0 = 331{,}4 \text{ m/s};$$

en las condiciones atmosféricas ordinarias, la velocidad es de 340 m/s, aproximadamente.

Fórmula de Laplace. — El estudio teórico de esta cuestión permitió a Laplace establecer la siguiente fórmula para la velocidad del sonido en el seno de un gas:

$$V = \sqrt{\gamma \frac{p}{\mu}},$$

fórmula en la que p representa la presión del gas y μ su masa específica, es decir, la masa de la unidad de volumen de gas en las condiciones de la experiencia; γ es un coeficiente que depende de la atomicidad del gas, es decir, del número de átomos que contiene su molécula; para los gases monoatómicos (gases raros, vapores metálicos), $\gamma = 1{,}67$; para los gases diatómicos, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, ... y sus mezclas (aire), $\gamma = 1{,}40$; para los gases triatómicos (anhídrido carbónico, sulfuro de carbono, ...), $\gamma = 1{,}32$.

Si se admite esta fórmula, es fácil demostrar que, conforme a la experiencia, la velocidad del sonido en un gas es independiente de la presión y varía proporcionalmente a la raíz cuadrada del binomio de dilatación. En efecto, si a_0 representa la masa específica del aire en las condiciones normales ($a_0 = 1{,}293$ g/l) y d la densidad del gas con respecto al aire, se tendrá la relación:

$$\mu = a_0 \times d \times \frac{p}{p_0} \cdot \frac{1}{1 + \alpha t};$$

p_0, presión normal; $\alpha = \dfrac{1}{273}$, coeficientes de dilatación.

Para un gas determinado, esta fórmula da $V = \sqrt{\gamma \dfrac{p_0}{a_0} \cdot \dfrac{1}{d} (1 + \alpha t)}$ y la velocidad del sonido a t^0, V_t, es, por consiguiente $V_t = V_0 \sqrt{1 + \alpha t}$; para los gases de la misma atomicidad, se observa que la velocidad del sonido varía en razón inversa de la raíz cuadrada de la densidad del gas.

Estas previsiones teóricas han podido comprobarse mediante un método de medida de la velocidad del sonido que utiliza las propiedades de los tubos sonoros (véase más adelante, pág. 76). En el hidrógeno por ejemplo, la velocidad del sonido es de 1 300 m/s, a 15° C; en el oxígeno es cuatro veces menor, siendo la densidad de este último con respecto al aire 16 veces mayor que la del hidrógeno.

Velocidad del sonido en los líquidos y sólidos. — La velocidad del sonido en el agua fue determinada por Colladon y Sturm, que realizaron en el lago de Ginebra la experiencia siguiente: se anclaban dos barcos a una distancia conocida. De uno de ellos pendía, sumergida en el agua, una campana grande, que se golpeaba con un martillo en el mismo momento en que una mecha, accionada por la varilla del martillo, encendía una cantidad pequeña de pólvora colocada en la parte delantera de la embarcación. En el otro barco, un observador medía el tiempo que transcurría entre el momento en que se divisaba el resplandor y el momento en que la onda sonora alcanzaba la membrana de una trompeta acústica sumergida en el agua. Se obtuvo una velocidad de 1 485 m/s, a la temperatura de 8° C.

En los sólidos, la velocidad del sonido es todavía mayor, del orden de 1 500 m/s para el acero, por ejemplo.

Ultrasonidos, infrasonidos. — Ya se ha dicho que un sonido sólo puede ser percibido por el oído humano si su frecuencia está comprendida entre 30 y 20 000 vibraciones por segundo, límites que varían de un observador a otro, pero la frecuencia de las vibraciones de un cuerpo material puede tener un valor cualquiera. Vibraciones de frecuencia inferior a 30 producen la impresión de un rodamiento más que de un sonido musical, y se las denomina "infrasonidos"; su estudio es interesante en relación con la resistencia de los materiales, a causa de las roturas que pueden producirse por resonancia. Las frecuencias superiores a 20 000 ya no son percibidas por el oído, aunque si su intensidad es suficiente producen una fatiga del mismo y provocan trastornos de la audición; se las denomina "ultrasonidos" y pueden ser producidas con silbatos, si no se desea que su frecuencia sea demasiado elevada, o utilizando también como fuente un cuarzo piezoeléctrico cuyas vibraciones elásticas son sostenidas por una lámpara de tres electrodos. Así se han producido ultrasonidos de frecuencia superior a varios millones. Estas frecuencias se reciben por receptores mecánicos, ya utilizando la presión de radiación que produce, ya haciéndolas actuar sobre un segundo cuarzo piezoeléctrico de las mismas dimensiones cuyas vibraciones excitan mecánicamente, y amplificando con lámparas de tres electrodos las diferencias de potencial correspondientes. Después puede hacerse que estas tensiones amplificadas actúen sobre un oscilógrafo catódico.

La técnica de los ultrasonidos ha progresado durante los últimos tiempos y sus aplicaciones son numerosas. Citemos el procedimiento de sondeo submarino con aparatos del tipo "Asdic". Un cuarzo emite ultrasonidos que son reflejados por un obstáculo, por ejemplo el fondo del mar, y recibidos por un receptor colocado al lado del emisor. La medida del tiempo que transcurre entre la ida y la vuelta de las vibraciones permite determinar a qué distancia se encuentra el obstáculo. Los ultrasonidos son en este caso superiores a los sonidos ordinarios, porque pueden ser dirigidos fácilmente por un haz estrecho, lo que limita su debilitamiento y permite localizar el obstáculo.

Cualidades fisiológicas del sonido

Las cualidades esenciales del sonido son la *intensidad*, la *altura* y el *timbre*.

Intensidad. — La intensidad de un sonido está ligada a la magnitud de la sensación que experimentamos al percibirlo y según la cual decimos que el sonido es "fuerte" o "débil".

1° La intensidad del sonido depende de la amplitud del movimiento vibratorio de la fuente que lo produce; el sonido producido por un diapasón, por ejemplo, se debilita a medida que se amortiguan sus oscilaciones.

2° La intensidad de un sonido depende de la superficie de la fuente sonora. El sonido producido por un diapasón se refuerza cuando se coloca éste sobre una mesa o sobre una caja de paredes delgadas que entran en vibración. Puede observarse que el aumento de la amplitud de la fuente y el de la superficie vibrante hacen que aumente simultáneamente la energía cinética de la masa de aire que está en contacto con ella; esta energía cinética aumenta, en efecto, con la masa del aire que se pone en vibración y con su velocidad media, que es proporcional al cuadrado de la amplitud.

3° La intensidad de percepción de un sonido por el oído depende también de su distancia a la fuente sonora. La energía vibratoria emitida por la fuente se distribuye uniformemente en ondas esféricas cuya superficie aumenta proporcionalmente al cuadrado de sus radios; la energía que recibe el oído es, por consiguiente, una fracción de la energía total emitida por la fuente, tanto menor cuanto más alejado está el oído; si la distancia es doble, la energía es cuatro veces menor.

Para evitar este debilitamiento, se canalizan las ondas por medio de un "tubo acústico" (portavoz) y se aumenta la superficie receptora aplicando al oído una "trompeta acústica".

4° Finalmente, la intensidad depende también de la "naturaleza del medio elástico" interpuesto entre la fuente y el oído. Los medios no elásticos, como la lana, el fieltro, etc., debilitan considerablemente los sonidos.

Altura o frecuencia de un sonido. — La "altura" de un sonido es la cualidad que corresponde a la sensación de sonido más o menos "agudo" o más o menos "grave".

El oído poco ejercitado no puede comparar con precisión las alturas de los sonidos; en cambio, un oído ejercitado aprecia con gran exactitud la igualdad de altura que corresponde a una sensación particular de "unísono".

Gran número de experiencias ponen de manifiesto que la altura de un sonido depende de la frecuencia del movimiento vibratorio de la fuente sonora: los sonidos más agudos son los que tienen mayores frecuencias, e inversamente; los físicos caracterizan la altura de un sonido por su frecuencia.

Para establecer experimentalmente estos resultados pueden utilizarse, por ejemplo, diapasones que registren diferentes frecuencias; más cómodo es emplear una "sirena", aparato que permite obtener a voluntad sonidos de diferentes alturas.

La *sirena* (*fig* 206) se compone de una caja cilíndrica C, en la que desemboca un tubo T; la pared superior está perforada por pequeños orificios *o*, dispuestos regularmente en una circunferencia cuyo centro está en el eje del cilindro. Estos orificios están constituidos por pequeños canalillos inclinados. Paralelamente a esta pared, y casi en contacto con la misma, se dispone un disco D, móvil alrededor de un eje zz' normal a la pared; este disco está atravesado por canalillos o' cuya inclinación es de sentido contrario a la de los canalillos de la caja.

Cuando se acciona el mecanismo de entrada del aire, éste llega a las paredes de los canalillos inclinados del disco móvil, que se pone en movimiento, y entonces se percibe un sonido, al principio grave y después cada vez más agudo, a medida que aumenta la velocidad de rotación del disco.

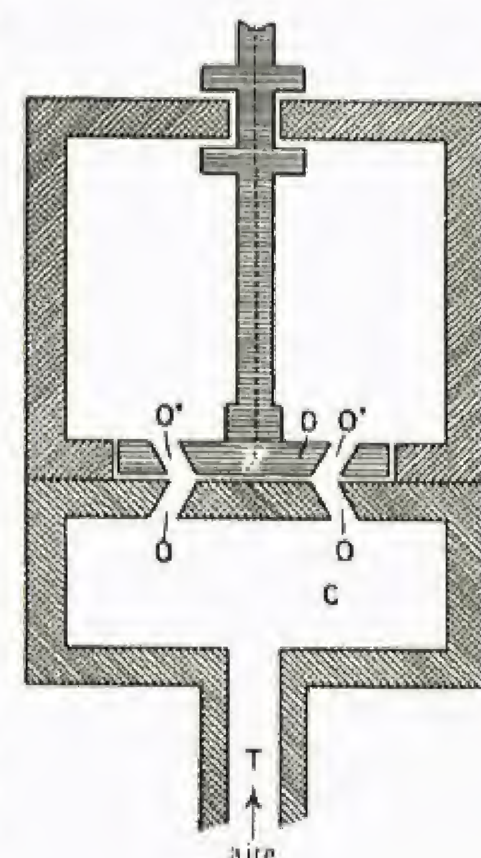


Fig. 206

El sonido es debido a los escapes bruscos de aire que se producen cada vez que los orificios de la plataforma móvil coinciden con los de la pared superior de la caja.

Cuando la presión del aire es constante, la velocidad de rotación del disco es también constante y la altura del sonido es fija. Si n es el número de vueltas del disco por segundo y p el número de orificios del disco y de la pared fija, se producirán p coincidencias en cada vuelta y, por consiguiente, np cada segundo: la frecuencia del sonido emitido será $N = np$.

Se comprueba que la altura del sonido aumenta cuando aumenta la velocidad de rotación del disco y, por consiguiente, la frecuencia de las vibraciones. Para medir N basta contar el número p de orificios del disco y determinar el número n de vueltas que da por segundo. Para ello se utiliza un "contador de vueltas"; este aparato consiste en un eje con un tornillo sin fin que acciona una rueda dentada; cada vuelta

del eje hace que la rueda avance un diente, es decir, una fracción de vuelta, que depende del número de dientes de la rueda. El movimiento de rotación de la rueda puede ser lo suficientemente lento para que pueda seguírsele y contar el número de vueltas que da la rueda durante un tiempo dado. Para utilizar el contador de vueltas se hace que su eje sea solidario del de la plataforma móvil de la sirena, y se cuenta el número de vueltas de la rueda durante un tiempo medido con un cuentasegundos.

Para determinar la frecuencia de un sonido por medio de la sirena, se regula la acción del mecanismo de entrada del aire hasta que el sonido que emita sea unísono del sonido que se estudia; una vez conseguido, los dos sonidos tienen la misma frecuencia, y basta determinar, como antes, la frecuencia del sonido emitido por la sirena.

Desplazamientos relativos del observador y de la fuente; principio de Doppler-Fizeau. — Se ha supuesto hasta ahora que la distancia entre el observador y la fuente del sonido permanece invariable; veamos lo que sucede cuando se desplaza cualquiera de ambos.

1° *Desplazamiento del observador.*

Supongamos la fuente S inmóvil y el observador O en movimiento hacia ella con una velocidad v; en este movimiento, el observador puede aproximarse o alejarse de la fuente.

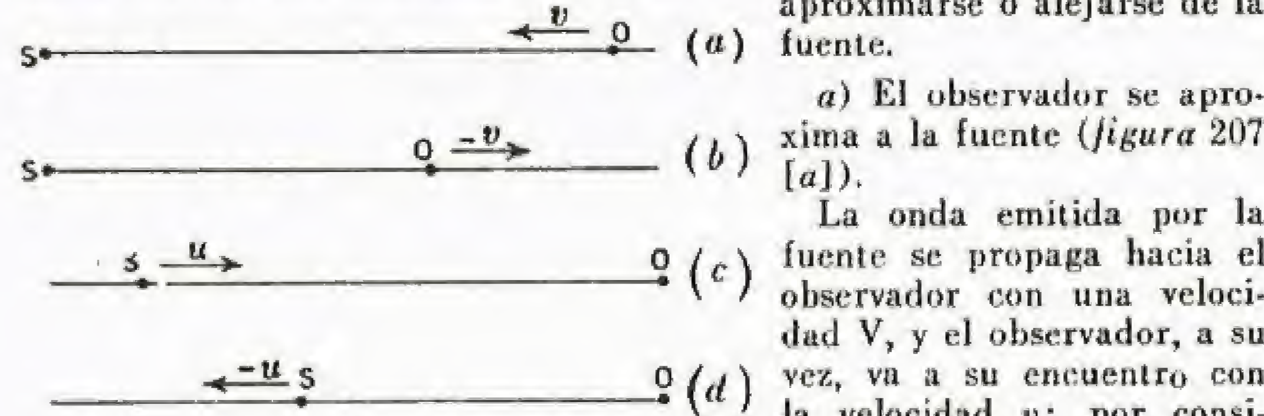


Fig. 207

a) El observador se aproxima a la fuente (*figura* 207 [*a*]).

La onda emitida por la fuente se propaga hacia el observador con una velocidad V, y el observador, a su vez, va a su encuentro con la velocidad v; por consiguiente, la velocidad del desplazamiento relativo de la onda con respecto al observador es $V + v$. Dos máximos sucesivos de la onda distan de la longitud de onda λ; si el observador estuviera inmóvil, ambos máximos serían percibidos por su oído con un intervalo de tiempo $T = \frac{\lambda}{V}$, y la altura del sonido sería la del sonido emitido, con una frecuencia $N = \frac{1}{T} = \frac{V}{\lambda}$; cuando el observador se mueve hacia la fuente con la velocidad v, dos máximos sucesivos de la onda son percibidos por su oído con un intervalo de tiempo

$$T' = \frac{\lambda}{(V + v)};$$

la frecuencia del sonido oído es $N' = \frac{1}{T'} = \frac{V + v}{\lambda}$,

o $N' = N \left[\frac{V + v}{V}\right]$.

La frecuencia del sonido percibido será mayor que la del sonido emitido; el sonido parece más agudo, fenómeno que se produce cuando al viajar en ferrocarril nos aproximamos a una locomotora inmóvil que silba.

b) El observador se aleja de la fuente.

Si el observador se aleja de la fuente inmóvil con una velocidad v, se obtiene, por un razonamiento idéntico al anterior, para el sonido percibido, una frecuencia $N' = N \left[\frac{V - v}{V}\right]$, menor que la frecuencia del sonido: el sonido percibido es más grave (*fig.* 207 [*b*]).

2° *Desplazamiento de la fuente.*

Supongamos ahora que el observador permanece inmóvil y que la fuente se mueve con una velocidad u; al moverse la fuente puede aproximarse o alejarse del observador.

a) La fuente se aproxima al observador (*fig.* 207 [*c*]).

Contemos los tiempos a partir del comienzo de una vibración de la fuente (paso del punto fuente por su posición de equilibrio), que denominaremos primera vibración; sea d, en este instante, la distancia entre la fuente y el observador; esta primera vibración llegará al observador en el instante $t_1 = \frac{d}{V}$.

La segunda vibración será emitida por la fuente en el instante T, y en dicho instante la distancia de la fuente al observador será $d - uT$; esta segunda vibración será percibida por el observador en el instante $t_2 = T + \frac{d - uT}{V}$; el intervalo de tiempo T′ que separa las llegadas al observador de las dos vibraciones sucesivas es $T' = t_2 - t_1 = T + \frac{d - uT}{V} - \frac{d}{V} = T - \frac{uT}{V}$, o $T' = T\frac{V - u}{V}$. La frecuencia aparente es $N' = \frac{1}{T'} = \frac{1}{T}\frac{V}{V - u}$, o $N' = N\frac{V}{V - u}$; el coeficiente $\frac{V}{V - u}$ es mayor que la unidad y, por consiguiente, la frecuencia N′ del sonido percibido es mayor que la del sonido emitido N; este fenómeno es el que pueden observar los viajeros que esperan un tren, si la locomotora entra en la estación silbando.

b) La fuente se aleja del observador (*fig.* 207 [*d*]).

Por un razonamiento análogo se obtiene para la frecuencia del sonido percibido: $N' = N\frac{V}{V + u}$.

3° *Desplazamientos simultáneos de la fuente y del observador.*

Razonamientos análogos muestran que si la fuente y el observador están simultáneamente en movimiento, la frecuencia del sonido resultante se expresa por la fórmula

$$N' = N\frac{V \pm v}{V \pm u}.$$

Timbre. — Dos sonidos de la misma intensidad y de la misma altura pueden producir sensaciones diferentes; así, dos instrumentos de música que emiten la misma nota al unísono pueden, no obstante, distinguirse. Se dice que ambos sonidos se distinguen por su "timbre".

La inscripción gráfica de las vibraciones de las fuentes sonoras de timbres diferentes ha permitido determinar la causa de estas diferencias. Mientras que la curva que se obtiene registrando los sonidos de un diapasón es una sinusoide, la curva de las vibraciones de una cuerda, cuerda de violín, por ejemplo, está constituida por ondulaciones periódicas cuya forma depende —al mismo tiempo que el timbre emitido— de la naturaleza de la cuerda, de la forma como se ha pulsado, así como de la forma y naturaleza de la caja de resonancia del violín (*fig.* 208).

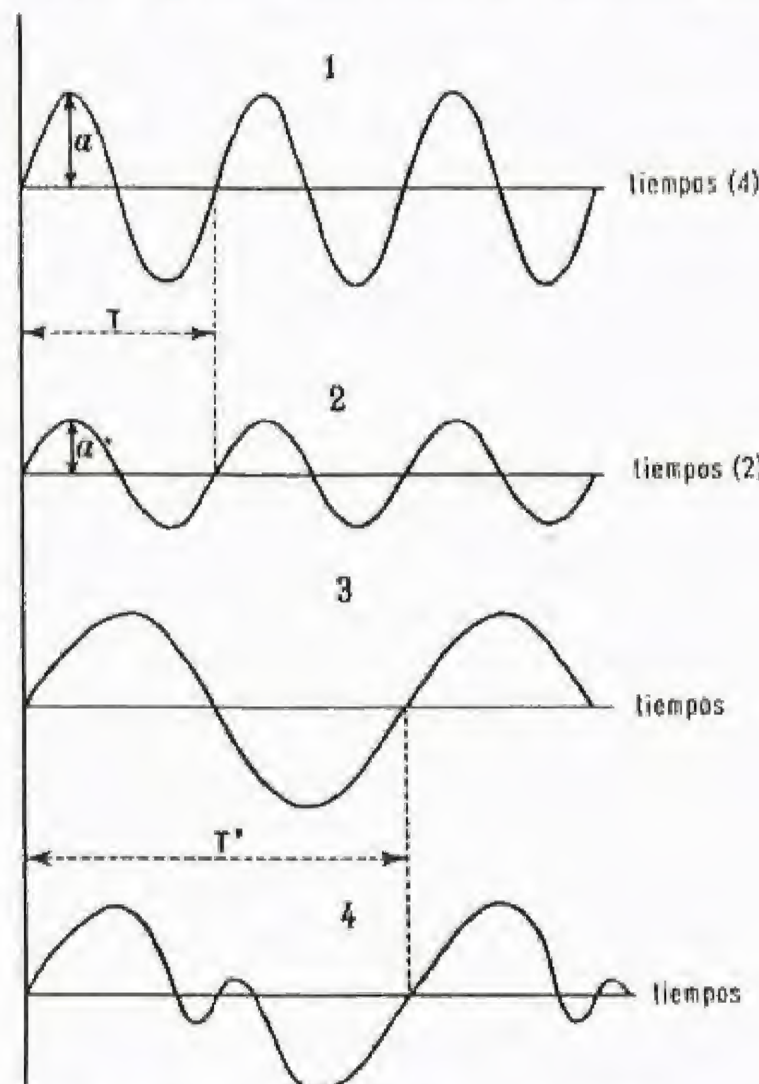


Fig. 208.—1 y 2, registro de vibraciones sinusoidales de igual período (igual altura del sonido) y diferentes amplitudes (diferentes intensidades del sonido); 3 y 4, sonidos de igual altura y timbres diferentes

Si las ondulaciones de la curva presentan una o varias periodicidades superpuestas sobre una curva periódica cuyo período corresponde al sonido principal emitido por la cuerda, el oído distingue varios sonidos superpuestos; uno, cuya frecuencia es la más baja y que en general tiene la intensidad máxima, corresponde al sonido principal o "fundamental", y los restantes, de frecuencias superiores y, por lo general, de intensidades menores, se denominan "armónicos".

La sensación que experimenta el oído corresponde al "timbre" del sonido complejo emitido. Un sonido, con sus armónicos, puede conservar durante toda la duración de su emisión una forma periódica, percibiendo el oído una sensación agradable: se dice que el sonido emitido es un sonido "musical"; las frecuencias de los armónicos son múltiplos enteros de la frecuencia del sonido fundamental.

El timbre de un sonido musical depende del número y de las intensidades relativas de los armónicos que acompañan el sonido fundamental.

Un sonido simple, como el de un diapasón, es pobre; la superposición de los primeros armónicos lo enriquece; los armónicos elevados demasiado intensos hacen el sonido chillón, y después, duro.

Cuando los sonidos auxiliares no son armónicos, el sonido resultante no conserva durante toda su duración una periodicidad ni, por consiguiente, una altura bien determinada. Además, se amortigua bastante rápidamente, razón por la cual tiende a parecerse a los ruidos (ruidos musicales); así sucede con las placas y membranas vibrantes (címbalos, campanas, tambores)

Intervalos musicales. Escalas. — Consideremos ahora una sucesión de sonidos musicales emitidos con cierto ritmo; tal sucesión constituye una "melodía". Si se reemplazan todos los sonidos de una melodía, conservando el mismo ritmo, por otros sonidos de forma que se conserven las "relaciones" entre las frecuencias de los sonidos sucesivos, el oído tiene la impresión de que la melodía no se ha alterado.

En cambio, una melodía parecería modificada si se reemplazaran todos los sonidos por otros que presentaran entre sí las mismas "diferencias" de frecuencia; por esta razón es por la que el "intervalo" de sonidos se ha definido no como la diferencia de sus frecuencias, sino como la relación entre las mismas.

Una melodía se caracteriza, pues, por el ritmo de la sucesión de los sonidos y por sus intervalos sucesivos.

PROBLEMA. *Dados tres sonidos, que designaremos por los números 1, 2 y 3, determinar el intervalo entre los sonidos 1 y 3, conociendo los intervalos de los sonidos 1 y 2 y 2 y 3.*

Se tendrá, por definición, $I_{13} = \frac{N_1}{N_3}$, $I_{12} = \frac{N_1}{N_2}$ y $I_{23} = \frac{N_2}{N_3}$,

pero $$\frac{N_1}{N_3} = \frac{N_1}{N_2} \times \frac{N_2}{N_3},$$

de donde $$I_{13} = I_{12} \times I_{23}.$$

Escala armónica. — Se denomina escala armónica la serie de ocho sonidos cuyos intervalos con respecto al primer sonido, denominado *tónica*, presentan relaciones particularmente sencillas. Para determinar la frecuencia de todos los sonidos que constituyen una escala armónica basta con fijar la frecuencia de uno de ellos.

En Francia se escogió, por convenio, en 1859, como sonido que sirve de referencia a todos los instrumentos de música, el denominado la_3, que es el emitido por un diapasón que vibra a razón de 435 vibraciones por segundo.

Este convenio es completamente arbitrario, de tal forma que el la_3 inglés corresponde a 457 vibraciones por segundo, y el la_3 alemán, a 440. Las diferencias son, por otra parte, difícilmente perceptibles.

Los sonidos entre los cuales existen los intervalos simples que caracterizan la escala armónica se denominan "notas".

Los nombres de estas notas, ordenadas con arreglo a su altura, son los siguientes:

Notas	*do*	*re*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*do*
Intervalos de las notas con respecto al *do*	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2

Estos diversos intervalos llevan nombres que recuerdan la posición de la nota correspondiente: intervalo de segunda $\frac{9}{8}$, de tercera $\frac{5}{4}$, de cuarta $\frac{4}{3}$, de quinta $\frac{3}{2}$, de sexta $\frac{5}{3}$, de séptima $\frac{15}{8}$, y de octava 2.

El problema estudiado anteriormente permite obtener fácilmente los intervalos de dos notas cualesquiera de la escala, en particular de los intervalos entre dos notas sucesivas:

$$re\text{-}do = \frac{9}{8};\quad mi\text{-}do = (mi\text{-}re) \times (re\text{-}do),$$

es decir $\frac{5}{4}$ $(mi\text{-}re) \times \frac{9}{8}$, de donde $mi\text{-}re = \frac{10}{9}$;

análogamente, $fa\text{-}do = (fa\text{-}mi) \times (mi\text{-}do) = fa\text{-}mi \times \frac{5}{4}$,

de donde $fa\text{-}mi = \frac{16}{15}$; análogamente se obtendría:

$$sol\text{-}fa = \frac{9}{8},\quad la\text{-}sol = \frac{10}{9},\quad si\text{-}la = \frac{9}{8},\quad do\text{-}si = \frac{16}{15}.$$

Nombre de las notas	*do*	*re*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*do*
Intervalos entre las notas sucesivas	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{16}{15}$.	

Obsérvese que en la escala armónica sólo existen tres intervalos distintos, dos de los cuales, $\frac{9}{8}$ y $\frac{10}{9}$, difieren poco; el intervalo $\frac{9}{8}$ se denomina "tono mayor" (T); el intervalo $\frac{10}{9}$ "tono menor" (t); $\frac{16}{15}$ se denomina "semitono" ($\frac{1}{2}$ T). La serie de los intervalos de la escala es, por consiguiente,

$$T,\ t,\ \frac{1}{2}\ T,\ T,\ t,\ T,\ \frac{1}{2}\ T.$$

La octava nota, que ocupa el lugar octavo a partir de la tónica, tiene una frecuencia doble de la de esta última, y lleva el mismo nombre, sirviendo de punto de partida, es decir, de tónica, a una nueva escala cuyas notas tienen los mismos nombres que los de la escala anterior; cada nota de esta nueva escala es la octava de la nota del mismo nombre de la escala anterior.

Para distinguir las diferentes escalas se asigna a cada una de sus notas un índice que aumenta una unidad por cada octava, en el sentido de la altura creciente, e inversamente. A la escala que contiene el *la* de 435 vibraciones se le asigna el índice 3; las notas de esta escala se escriben, pues: do_3, re_3, ..., la_3, si_3, do_4; en el do_4 comienza la escala siguiente. Las escalas más bajas llevan los índices 2, 1 (el índice 0 no se emplea), — 1, — 2; el la_{-2} tiene una frecuencia de $\frac{435}{16}$, o sea 27, y es la nota más baja del piano.

Problema. *Determinar la frecuencia de una nota cualquiera.*

Sea la frecuencia que se quiere determinar, por ejemplo, el mi_5, que es la nota más aguda de la voz humana; el problema se reduce a determinar la nota del mismo nombre de la escala de índice 3. En efecto, la frecuencia del mi_5, que es la octava del mi_4, es igual al doble de la frecuencia del mi_4, frecuencia que a su vez es el doble de la del mi_3; por consiguiente, la frecuencia del mi_5 es cuatro veces la del mi_3. Si se parte de la frecuencia del la_3, es fácil encontrar las frecuencias de las notas sucesivas de la escala de índice 3; primeramente, la del do_3: se tendrá, $la_3\text{-}do_3 = \frac{5}{3}$; de donde $do_3 = \frac{3}{5}\ 435$, $do_3 = 261$; después se obtienen fácilmente las frecuencias de las demás notas utilizando los valores de sus intervalos con el do_3; así, para las frecuencias de las notas de la escala 3 se obtiene:

do_3	re_3	mi_3	fa_3	sol_3	la_3	si_3	do_4
261	294	326	348	393	435	489	522;

la frecuencia del mi_5 es, por consiguiente: $mi_5 = 4 \times 326 = 1304$.

Problema. *Determinar la nota más próxima a un sonido de frecuencia dada.*

Si la frecuencia dada está comprendida entre 261 y 522, la nota se encuentra en la escala 3, y el examen del cuadro anterior permite determinar inmediatamente la nota buscada. Si la frecuencia del sonido dado es mayor que 522, se divide por dos tantas veces como sea necesario para obtener un número comprendido entre 261 y 522.

Ejemplo. *¿Cuál es la nota más próxima al sonido de frecuencia 1 395?*

Habrá que dividir 1 395 por 4 para encontrar un cociente 349, comprendido entre 261 y 522; este número 349 es el que más se aproxima a 348, es decir, a la frecuencia del fa_3 y, por consiguiente, el sonido dado está muy próximo al fa_5. Si la frecuencia del sonido dado fuera menor que la del do_3, se la multiplicaría por 2 las veces que fuera necesario para obtener un número comprendido entre 261 y 522 y se razonaría en la forma anterior.

Armónicos. — Se denomina *armónico* de un sonido musical simple, llamado *sonido fundamental*, el sonido musical simple cuya frecuencia es un múltiplo "entero" de la frecuencia del sonido fundamental. Se ha convenido en llamar armónico del orden n al enésimo armónico, cuya frecuencia es nN; por consiguiente, el primer armónico es el propio sonido fundamental. El cuadro siguiente indica los 12 primeros armónicos de do_2; en la primera línea figuran las frecuencias, en la segunda los intervalos referidos al de la tónica más cercana y en la tercera las notas correspondientes a estos armónicos.

N	2N	3N	4N	5N	6N	7N	8N	9N	10N	11N	12N
1	2	$\frac{3}{2}$	2	$\frac{5}{4}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{7}{4}$	2	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{11}{8}$	$\frac{3}{4}$
do_2	do_3	sol_3	do_4	mi_4	sol_4			do_5	re_5	mi_5	sol_5

Obsérvese que los únicos armónicos que no figuran en las notas de la escala armónica son el 7º y el 11º, debiéndose, precisamente, el nombre de escala armónica a esta propiedad de contener la mayor parte de los armónicos de sus propias notas.

Se verá cómo los sonidos emitidos por los instrumentos de cuerda o de viento no son sonidos musicales simples, sino que contienen un número mayor o menor de armónicos, según la forma en que se emiten, y también según la naturaleza y la forma del instrumento. Si con tales instrumentos se emite una serie de sonidos (melodía), estos sonidos presentarán para el oído una continuidad particular, agradable si poseen armónicos comunes, lo que se producirá si dichos sonidos pertenecen a las notas de la escala armónica; por la misma razón, varios sonidos emitidos simultáneamente se fundirán, dando un "acorde" particularmente agradable si contienen armónicos comunes; estos acordes se denominan "consonantes".

Los fenómenos de "resonancia" ponen de relieve, como veremos más adelante, la intensidad de los armónicos.

Sostenidos y bemoles. — Ya se ha dicho que la melodía de una sucesión de sonidos se conserva si se la substituye por otra melodía que tenga los mismos intervalos; así ocurrirá si se multiplican o se dividen todas las frecuencias de los sonidos de la primera sucesión por un mismo número.

Si este número es uno de los intervalos de la escala de la tónica *do*, se obtiene para la melodía, que se dice "transportada", una nueva tónica que también pertenece a la escala.

Si se multiplican, por ejemplo, todas las frecuencias por $\frac{3}{2}$, se pasa de la tónica *do* a la tónica *sol*.

Ahora bien, a causa de la irregularidad con la que se suceden en la escala armónica los tonos —mayores o menores— y los semitonos, no podrían reproducirse los intervalos de la escala que comienza con *do* emitiendo sucesivamente las notas de la escala a partir del *sol*. Para conservar la concordancia de los intervalos, es necesario modificar ciertas notas. Esta transformación permitirá reemplazar un tono mayor por un tono menor, o inversamente; un semitono por un tono mayor o un tono menor, o inversamente.

Por ejemplo: empezando por *do*, se encontrarán los intervalos normales de la escala:

do	*re*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*do*;
T	t	$\frac{1}{2}$ T	T	t	T	$\frac{1}{2}$ T	

si se empieza por *sol*, se encontrarán los intervalos:

sol	*la*	*si*	*do*	*re*	*mi*	*fa*	*sol*;
t	T	$\frac{1}{2}$ T	T	t	$\frac{1}{2}$ T	T	

entre el *sol* y el *la* sólo hay un tono menor, $\frac{10}{9}$, en lugar del tono mayor de $\frac{9}{8}$ que existe entre el *do* y el *re*; habrá, pues, que reemplazar el *la* por un sonido cuya frecuencia presente con el *la* un intervalo x, tal que $\frac{10}{8} \cdot x = \frac{9}{8}$, o sea $x = \frac{81}{80}$. Este intervalo, cer-

cano a la unidad, se denomina "coma"; si a una nota se le aumenta o se le disminuye una coma, sigue conservando el nombre de la nota no modificada, ya que el coma es el menor intervalo que un oído puede apreciar. Esta modificación pueden hacerla los buenos instrumentistas, que pueden modificar los sonidos a voluntad (violinistas, violoncelistas); no podrá hacerse en los instrumentos de sonidos fijos (pianos, órganos, ...).

Análogamente, entre el *mi* y el *fa* de la segunda sucesión sólo existe un semitono $\frac{16}{15}$, en lugar de un tono mayor $\left(\frac{9}{8}\right)$ entre el *la* y el *si* de la escala que empieza por *do*, por lo que habrá que substituir el *fa* por un sonido que represente con dicho *fa* un intervalo *y*, tal como

$$\frac{16}{15} \cdot y = \frac{9}{8}, \text{ de donde } y = \frac{25}{24} \times \frac{81}{80}.$$

Análogamente, para transformar un semitono $\left(\frac{16}{15}\right)$ en un tono menor $\left(\frac{10}{9}\right)$ habrá que multiplicarlo por un intervalo de $\frac{25}{24}$, un coma inferior. La diferencia de un coma se desprecia, y la nota aumentada en un intervalo $\frac{25}{24}$ o $\frac{25}{24} \times \frac{81}{80}$ se denomina sostenida; una nota disminuida en $\frac{25}{24}$ o en $\frac{25}{24} \times \frac{81}{80}$, se denomina bemolizada.

La escala cuya tónica sea *sol* constará, pues, de las notas siguientes: *sol, la, si, do, re, mi, fa* (sostenido), *sol*, que se confunde con la escala *sol, la, si, do, re, mi, sol* (bemol) *sol*.

El *fa* sostenido se representa gráficamente por *fa* ♯ y el *sol* bemol por *sol* ♭.

Escala temperada. — Los transportes efectuados en la escala armónica requieren, por consiguiente, un gran número de notas cuyas frecuencias son, en algunos casos, casi iguales; para facilitar la técnica musical ha sido necesario, especialmente para los instrumentos de sonidos fijos, confundir las notas inmediatas, igualando los intervalos; de esta forma se obtiene una escala un poco diferente de la escala armónica, denominada "escala temperada".

Esta gama consta de 12 intervalos iguales, denominados semitonos temperados. El intervalo de un semitono temperado es tal que $I \times I \times I \times \ldots = I^{12} = 2$. Tomemos logaritmos:

$$12 \times \log I = \log 2,$$

de donde, logaritmo de $I = \frac{I}{12} \log 2$,

$$\log I = \frac{0{,}301}{12} = 0{,}025.$$

Se denomina *savart* el intervalo cuyo logaritmo vale 0,001: el semitono temperado vale, por consiguiente, 25 savarts; un tono temperado vale 50 savarts y una octava 300 savarts, con un error de un savart.

El transporte en la escala temperada es muy sencillo, ya que añadiendo o disminuyendo a cualquier nota un número dado de semitonos vuelve siempre a obtenerse una nota de la escala temperada. El teclado del piano materializa esta sucesión de notas: las teclas blancas corresponden a la nota de la escala, y las negras a los sostenidos y a los bemoles, que están confundidos. La tecla negra situada entre el *do* y el *re* representa el *do* sostenido y el *re* bemol.

PROBLEMA. *Determinar la frecuencia de una nota en la gama temperada.*

Sea el fa_3 de la escala temperada la nota cuya frecuencia se quiere determinar. Su intervalo con el la_3 es de cuatro semitonos temperados. Por consiguiente,

$$\log N' = \log N - 4 \times 0{,}025$$
$$\log N = \log 435 = 2{,}638$$
$$\log N' = 2{,}538, \text{ de donde } N' = 345,$$

poco diferente de 348, que es la frecuencia del fa_3 de la escala armónica.

La escala temperada difiere, por consiguiente, muy poco de la escala natural o armónica. Las diferencias sólo son perceptibles a los oídos muy ejercitados. Fue adoptada por el gran músico J. S. Bach. No obstante, esta escala tiene como efecto aumentar el ritmo de la música instrumental, ya que si se emiten simultáneamente dos notas de la escala temperada, las frecuencias de sus armónicos son muy aproximadas, sin ser iguales; estos armónicos producen batimientos desagradables, sobre todo en las notas graves, efecto que desaparece si la duración de cada nota es lo suficientemente corta para que el oído no pueda percibirla.

Cuerdas vibrantes

Sonómetros. — Las cuerdas vibrantes son cuerdas elásticas de acero, de tripa seca o de nylon; en todos los instrumentos musicales que utilizan estas cuerdas (piano, violín, guitarra, mandolina, harpa...), están más o menos tensadas entre piezas fijas (clavijas, puentes). Para hacer vibrar una cuerda se la separa de su posición de equilibrio, ya con el dedo, como en la guitarra y el harpa, ya con un arco, como en el violín, el contrabajo, etc., ya con un martillo, como en el piano.

La altura del sonido emitido depende de la tensión y de la naturaleza de la cuerda. La experiencia muestra que la altura del sonido aumenta cuando aumenta la tensión y cuando disminuye la longitud. Para un estudio experimental más preciso puede recurrirse al sonómetro.

El sonómetro es un aparato constituido por una caja R destinada a reforzar los sonidos; sobre la parte superior de esta caja pueden tensarse las cuerdas que hay que estudiar entre dos clavijas A y B cuya distancia, medida sobre una escala, da la longitud de la cuerda. La cuerda se tensa más o menos mediante pesos variables P (*fig.* 209).

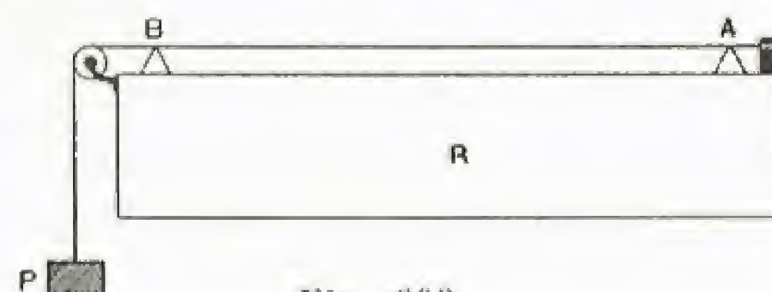


Fig. 209

En una primera serie de experiencias destinadas a estudiar la influencia de la longitud, se deja fija la tensión de la cuerda y se modifica su longitud, separando más o menos A y B; se obtiene así la siguiente ley:

Ley de las longitudes. — *La frecuencia del sonido emitido por una cuerda es inversamente proporcional a su longitud.*

Para estudiar la acción de la tensión, se deja fija la longitud de la cuerda y se modifica el peso tensor, obteniéndose así la siguiente ley:

Ley de las tensiones. — *La frecuencia del sonido emitido por una cuerda es proporcional a la raíz cuadrada de la tensión de dicha cuerda.*

Utilizando cuerdas de naturaleza y sección diferentes puede mostrarse que:

La frecuencia del sonido emitido por una cuerda es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la masa de la unidad de longitud de dicha cuerda.

Las leyes de las cuerdas vibrantes pueden resumirse en la fórmula

$$\text{(I)} \quad N = \frac{\sqrt{F}}{2l\sqrt{m}}.$$

Esta fórmula debe aplicarse con unidadse coherentes: la longitud (longitud de cuerda comprendida entre los puntos fijos) deberá evaluarse en centímetros, la tensión en dinas, la masa lineal en gramos por centímetro.

Estudio teórico. — La observación directa de una cuerda o, mejor todavía, su examen estroboscópico, muestran que los diferentes puntos de la cuerda están animados de vibraciones transversales, y que se crea un sistema de ondas estacionarias en el que los puntos fijos son nodos inmóviles y el punto medio de la cuerda un vientre de vibración.

Como ya se ha visto, en tal sistema la distancia que separa dos nodos, es decir, la longitud de la cuerda, es igual a una semilongitud de onda; por consiguiente, existirá la relación

$$l = \frac{\lambda}{2}; \text{ pero } \lambda_1 = VT_1,$$

en la que V es la velocidad de propagación de las deformaciones elásticas a lo largo de la cuerda y T_1 el período de las vibraciones. Por otra parte, se tiene $T_1 = \frac{1}{N_1}$ (en la que N_1 es la frecuencia), de donde se obtiene: $N_1 = \frac{V}{2l}$, fórmula que expresa la ley de las longitudes.

Basándose en consideraciones mecánicas, puede también demostrarse que la velocidad de propagación es $V = \sqrt{\frac{F}{m}}$; volviéndose así a obtener la fórmula completa de las cuerdas vibrantes.

Armónicos. — (V. pág. 73). El sistema de ondas estacionarias con un nodo en cada extremidad y un vientre en el punto medio de la cuerda no es el único que pueda formarse. Si en la experiencia del sonómetro se coloca un puente C en el punto medio de la cuerda y se hace vibrar la cuerda entre A y C o entre C y B, se forma un sistema de ondas estacionarias que tienen un nodo en C y dos vientres en D y E (*fig.* 210); se observa entonces que puede quitarse el puente C sin modificar el sistema de ondas estacionarias y que la nota emitida por la cuerda en estas condiciones es la octava aguda de la nota emitida cuando el punto medio de la cuerda es un vientre de vibración.

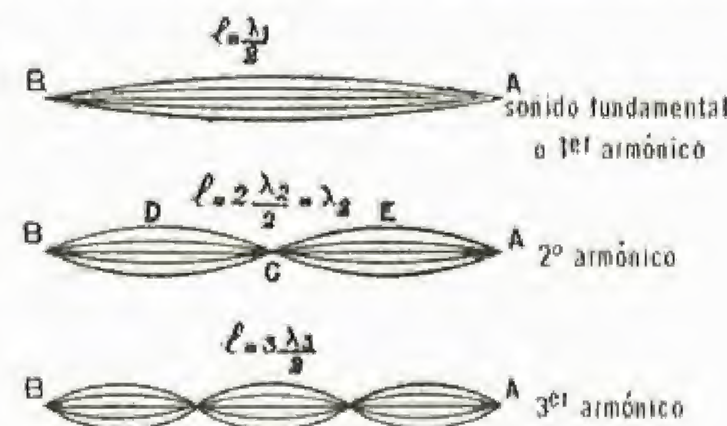


Fig. 210

También se llega a este resultado teóricamente; se tendrá, en efecto,

$$\frac{\lambda_2}{2} = \frac{l}{2}, \text{ ó } \lambda_2 = l; \text{ pero } \lambda_2 = VT_2 = \frac{V}{N_2}, \text{ de donde}$$

$$N_2 = \frac{V}{l} = 2N_1.$$

También puede excitarse la cuerda de forma que se formen dos, tres, ..., nodos entre las extremidades; la experiencia y un razonamiento análogo al anterior ponen de manifiesto y explican que la cuerda puede de esta forma emitir todos los armónicos sucesivos del sonido fundamental que se emite cuando sólo existe un nodo en cada extremidad.

Los armónicos se producen, en la mayoría de los casos, al mismo tiempo que el sonido fundamental, y el sonido resultante tiene entonces un timbre que depende del número y de las intensidades relativas de los diferentes armónicos. La producción de los armónicos depende de la forma en que se hace vibrar la cuerda, así como de la amplitud de la deformación inicial y de la posición del punto de ataque; esto explica las diferentes sonoridades que los artistas pueden obtener de un mismo instrumento.

Instrumentos de cuerda. — En el piano, que es un instrumento de sonidos fijos, las cuerdas son de acero; a cada nota corresponde una cuerda o varias cuerdas al unísono. Estas cuerdas están sometidas a una misma tensión, de 40 kilogramos aproximadamente; para afinar un piano se establece primeramente, por medio de un diapasón, el unísono para el *la₃*, regulando la tensión, y después se va regulando sucesivamente la tensión de las restantes notas utilizando los acordes de octava, de quinta, etc. Las cuerdas del piano son finas y cortas para las notas elevadas, y más largas y más gruesas para las notas bajas; para aumentar la sección de las cuerdas sin que su diámetro sea demasiado grande se arrolla alrededor de las mismas un hilo de cobre. Cada cuerda entra en vibración al percutir sobre ella un martillo forrado de fieltro, que es accionado por la correspondiente tecla del piano.

Ya se ha visto que las intensidades respectivas de los diferentes armónicos dependen de la posición del punto de ataque de la cuerda. Como los armónicos 7′ y 9′ producen una impresión desagradable, se atenúa su sonido haciendo que el martillo golpee entre la séptima y la novena parte de la longitud de la cuerda.

El violín, instrumento de sonidos variables, tiene cuatro cuerdas de tripa, de la misma longitud, pero de diámetros diferentes. Los sonidos de dichas cuerdas son: *sol, re, la, mi,* separados por intervalos de quinta; para afinarlos, se regula la tensión de las cuerdas mediante las clavijas a las cuales se arrollan. Las cuerdas se ponen en vibración por medio de un arco, y apoyando los dedos sobre las cuerdas se modifican sus longitudes de forma que emitan sonidos diferentes.

Tubos sonoros

Producción de vibraciones en los tubos. — Los tubos sonoros son tubos de formas diversas; cuando se sopla en ellos, de forma que se provoquen vibraciones en el aire que contienen, el tubo emite un sonido musical. El extremo por la cual se insufla el aire en el tubo se denomina *embocadura,* y el otro extremo puede ser abierto o cerrado, denominándose el tubo, respectivamente, "abierto" o "cerrado".

Existen diferentes tipos de embocaduras, distinguiéndose en particular la embocadura de *flauta,* que lleva un bisel colocado ante una rendija por la cual sale el aire que se insufla (*fig.* 211), y la embocadura de *lengüeta,* en la cual la entrada del aire produce la vibración de una lámina elástica (clarinete). La lengüeta libre puede oscilar a ambos lados de su posición de equilibrio, y el otro tipo de lengüeta a un solo lado. En casi todos los instrumentos de cobre (trombón, trompeta, ...), las vibraciones del aire son producidas por los labios del músico, que hacen el papel de la lengüeta.



Fig. 211

Leyes de los tubos sonoros rectilíneos, de sección uniforme y con embocadura de flauta. — Las leyes de tales tubos son muy sencillas y se aplican, aproximadamente, a tubos de formas cualesquiera.

Primera ley. *La altura del sonido más grave (sonido fundamental) emitido por un tubo sonoro rectilíneo, de sección constante, es independiente de la naturaleza de la substancia de que está formado el tubo y de la forma de la sección.*

Esta ley se establece actuando por medio de un mecanismo de insuflamiento que produzca poco viento sobre tubos de la misma longitud y de tipo y secciones diferentes, comprobándose que dan todos la misma nota.

Observaciones. La longitud de los tubos es la comprendida entre la arista del bisel y el extremo del tubo. Las dimensiones de la sección deben ser relativamente pequeñas con respecto a la longitud del tubo; por ejemplo, el diámetro de un tubo de sección circular debe ser, como máximo, la décima parte de su longitud.

Segunda ley (ley de las longitudes). *La frecuencia del sonido fundamental emitido por un tubo sonoro es inversamente proporcional a su longitud.*

Esta ley se establece accionando tubos de longitudes diferentes y determinando la frecuencia del sonido por medio de una sirena.

Tubos abiertos y tubos cerrados. — Ley. *Un tubo cerrado emite el mismo sonido fundamental que un tubo abierto de longitud doble.*

Se verifica este hecho determinando el sonido emitido por un tubo con su extremo abierto, y cerrando después el tubo por su mitad. De esta forma puede comprobarse que si se tapa el tubo abierto por su extremo, el tubo cerrado que así se obtiene emite un sonido que es la octava grave del sonido emitido por el tubo abierto. Los tubos cerrados se utilizarán, por consiguiente, para producir los sonidos graves, con objeto de evitar el empleo de tubos demasiado largos.

Ley de los armónicos. *Al soplar cada vez más fuerte en un tubo se comprueba que dicho tubo emite sucesivamente armónicos del sonido fundamental. Los tubos abiertos pueden emitir "todos" los armónicos, y los tubos cerrados sólo los armónicos "impares".*

Para establecer esta ley experimentalmente se comprueba que un tubo abierto sobre el cual se intensifica progresivamente la acción del mecanismo de insuflamiento produce el mismo sonido que un tubo abierto de la mitad de su longitud, y después el mismo sonido que un tubo tres veces más corto.

Estado vibratorio de un tubo sonoro. — Puede mostrarse experimentalmente que el sonido emitido por un tubo es debido a las vibraciones del gas y no a las de sus paredes, lo que se debe al hecho indicado de que el sonido emitido no depende de la naturaleza de estas últimas. Tampoco se modifica el sonido por el hecho de asir el tubo con toda la mano.

El sonido no es debido tampoco a la circulación del gas, ya que en los tubos cerrados no se produce tal circulación.

Puede, en cambio, mostrarse fácilmente que el aire vibra en el interior del tubo; para ello se toma un tubo de vidrio, o que tenga una pared de vidrio, y se introduce en el mismo una membrana elástica salpicada con arena fina, pudiendo observarse, a través de la pared transparente, los saltos que da la arena al accionar el tubo.

Esta experiencia permite mostrar que en el tubo se produce un sistema de ondas estacionarias, ya que si se desciende progresivamente la membrana, se comprueba que en ciertas posiciones la arena no se mueve y que estas posiciones son mutuamente equidistantes. Las porciones de gas correspondientes no vibran, por ser los nodos de vibración.

En un tubo abierto que emite el sonido fundamental, el nodo de vibración se encuentra exactamente en el punto medio del tubo. Si emite el sonido que está en la octava del precedente, se obtienen dos nodos situados en el primero y en el tercer cuarto de longitud del tubo.

El nodo de vibración situado en el punto medio de un tubo abierto que produce el sonido fundamental explica por qué no se modifica el sonido emitido cuando se coloca dentro de esta porción media una pared rígida; así se comprende que un tubo cerrado emita el mismo sonido que un tubo abierto de longitud doble.

Estas observaciones, y otras análogas, han llevado a la conclusión de que "cuando un tubo sonoro de embocadura de flauta emite un sonido musical, existe en la embocadura un vientre de vibración y en el otro extremo un vientre cuando el tubo es abierto, y un nodo, cuando el tubo es cerrado".

Representación gráfica del estado vibratorio del gas dentro de un tubo. — Las vibraciones del gas que llena un tubo sonoro son vibraciones longitudinales; cada porción de gas vibra alrededor de una posición media de equilibrio sin que el gas fluya sensiblemente a través del tubo. Las elongaciones están dirigidas a lo largo del eje del tubo, es decir, en la dirección de propagación de las vibraciones, cuyo origen se encuentra en la embocadura del tubo.

Hemos visto que resulta cómodo representar gráficamente el estado de un medio —en el que se producen vibraciones longitudinales— llevando las elongaciones de cada punto perpendicularmente a sus direcciones reales, como si las vibraciones fueran transversales.

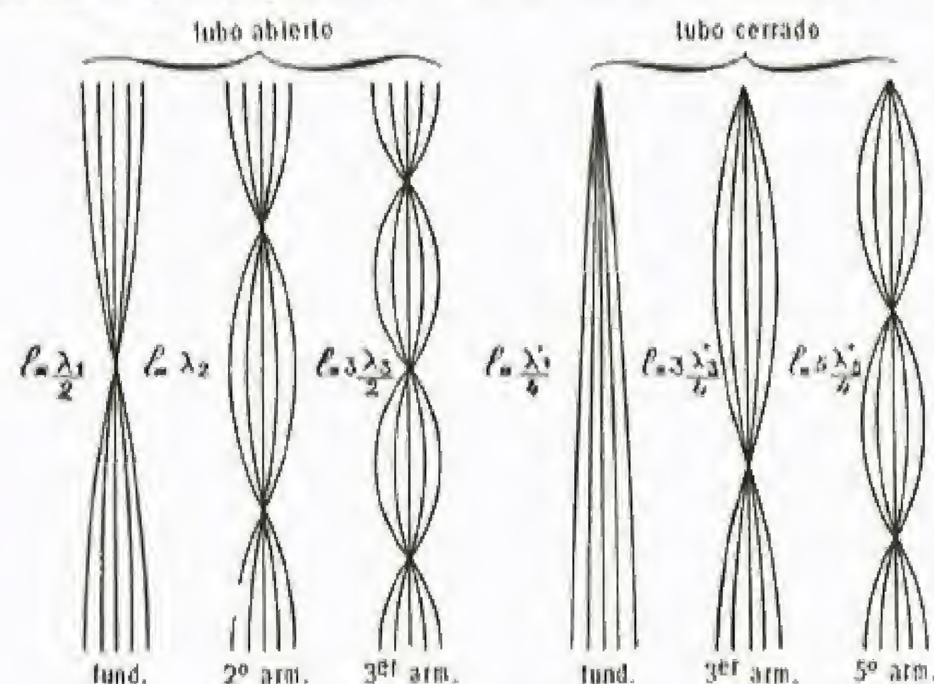


Fig. 212

Con este modo de representación se obtienen figuras análogas a las obtenidas para las cuerdas vibrantes; los tubos cerrados presentan un nodo de vibración en su extremo cerrado y un vientre en su extremo abierto (*fig.* 212).

Fórmulas de los tubos sonoros. — Basándose en estas consideraciones pueden demostrarse las leyes experimentales ya indicadas y preverse ciertas consecuencias que la experiencia comprueba.

1º *Caso de los tubos abiertos.* Cuando el tubo emite el sonido fundamental, existe un vientre en sus dos extremos; sea λ_1 la longitud de la onda del sonido emitido; de acuerdo con la teoría de las ondas estacionarias, se tendrá:

$$l = \frac{\lambda_1}{2}; \text{ pero } \lambda_1 = VT_1 = \frac{V}{N_1}, \text{ de donde } N_1 = \frac{V}{2l}.$$

Esta fórmula demuestra que la altura del sonido fundamental varía en razón inversa de la longitud del tubo, lo que constituye la ley de las longitudes. Sabemos, además, que se forma un nodo a distancias iguales de dos vientres consecutivos, es decir, en el punto medio del tubo, como se ha establecido por experiencia directa.

Puede crearse otro sistema de ondas estacionarias con un vientre en cada extremo y dos nodos intermediarios; para tal sistema, se tendrá una longitud de onda λ_2, tal como

$$l = \frac{\lambda_2}{4} + \frac{\lambda_2}{2} + \frac{\lambda_2}{4} = \lambda_2; \text{ pero } \lambda_2 = VT_2 = \frac{V}{N_2}, \text{ de donde}$$

$$N_2 = \frac{V}{l} = 2N_1.$$

El sonido emitido de frecuencia doble de la de N_1 es la octava del sonido fundamental.

Análogamente se demostraría que los diversos sistemas posibles de ondas estacionarias corresponden a la emisión de todos los armónicos sucesivos del sonido fundamental.

2º *Casos de los tubos cerrados.* La emisión del sonido fundamental corresponde al establecimiento de un sistema de ondas estacionarias con un vientre en la embocadura y un nodo en el extremo. Por consiguiente, se obtendrá

$$l = \frac{\lambda'_1}{4}; \text{ pero } \lambda'_1 = VT' = \frac{V}{N'_1},$$

de donde
$$N'_1 \frac{V}{4l} = \frac{N_1}{2}.$$

El tubo cerrado emite un sonido que es la octava grave del tubo abierto de la misma longitud.

El armónico siguiente corresponde a un nuevo sistema de ondas que tiene un nodo en el primer tercio del tubo, de forma que se tendrá

$$l = \frac{\lambda'_3}{4} + \frac{\lambda'_3}{2} = \frac{3}{4}\lambda'_3; \text{ pero } \lambda'_3 = VT'_3 = \frac{V}{N'_3},$$

de donde
$$N'_3 = 3\frac{V}{4l}.$$

Este nuevo sonido es el tercer armónico del sonido fundamental. Se vería análogamente, al examinar los diversos sistemas posibles de ondas estacionarias, que pueden emitirse todos los armónicos impares.

Variaciones de presión en los diferentes puntos de un tubo sonoro. — Ya se ha indicado que la existencia de ondas estacionarias de vibraciones longitudinales va acompañada por fenómenos de condensación y de dilatación, es decir, en el caso en que el medio elástico sea un gas, de variaciones de presión.

La teoría general indica que estas variaciones de presión son máximas en las partes del gas que permanecen inmóviles, es decir, en los nodos de vibración, y nulas en los vientres.

Es fácil mostrar estos fenómenos en el caso de los tubos sonoros. Para ello se pone en comunicación el punto del tubo donde se quiere estudiar la presión con una cápsula de Marey (*fig.* 213) alimentada con gas de alumbrado, y se enciende la llama; las variaciones de presión que se producen en el interior del tubo actúan sobre la membrana, aumentando o disminuyendo la presión del gas, y hacen variar la longitud de la llama. Si se examina esta última mediante un espejo giratorio, se obtiene una imagen cuya forma nos permite conocer las variaciones de presión en el interior del tubo; si la longitud de la llama es constante, la presión es fija, resultado que se observa cuando la cápsula está unida a un vientre de vibración, por ejemplo, al punto medio de un tubo abierto que da el segundo armónico; si la llama presenta oscilaciones, es que la presión varía, comprobándose que estas oscilaciones tienen una amplitud máxima cuando la cápsula está unida a un nodo de vibración, por ejemplo, al punto medio de un tubo abierto que emite el sonido fundamental.

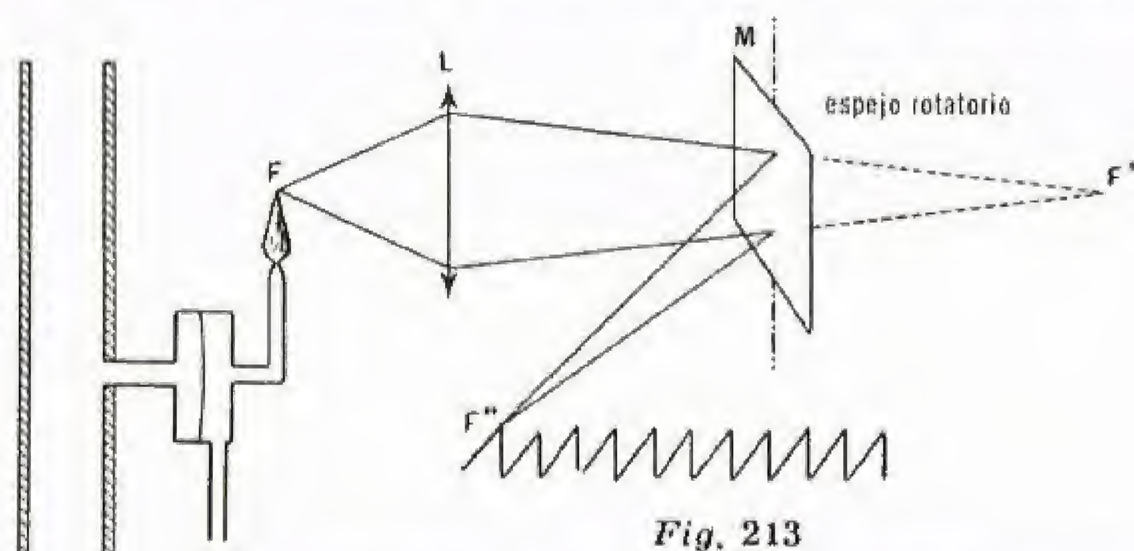


Fig. 213

Si se conoce la velocidad de rotación del espejo y su distancia a la llama que vibra, puede calcularse fácilmente la velocidad de desplazamiento de la imagen (para obtener la imagen real que se forma sobre una pantalla puede utilizarse un espejo cóncavo o bien, por medio de una lente, obtener primero una imagen de la llama que actúe como objeto virtual con respecto al espejo giratorio plano, que proporcionará una imagen real). Para determinar la frecuencia del sonido emitido por el tubo basta entonces con contar el número de oscilaciones sobre una longitud conocida de la pantalla.

Estas experiencias con las llamas vibrantes constituyen una confirmación notable de la teoría de las ondas estacionarias.

Medida de la velocidad del sonido en los diferentes gases. — En las fórmulas precedentes, V representa la velocidad de propagación del movimiento vibratorio en el gas que llena el tubo, es decir, la velocidad del sonido en este gas; si por medio de una sirena se determina experimentalmente el sonido emitido por un tubo cuya longitud se ha medido, las fórmulas dan la velocidad del sonido en el gas que llena el tubo, a la temperatura de la experiencia.

Como la medida de la longitud del tubo no es muy precisa, se prefiere determinar la frecuencia del sonido que emite el tubo cuando está lleno de aire, y después cuando se ha substituido el aire por el gas que se estudia; si N y N' son las frecuencias de los sonidos fundamentales emitidos por un mismo tubo abierto, lleno sucesivamente con aire y con anhídrido carbónico, se obtendrá

$$N = \frac{V}{2l} \text{ y } N' = \frac{V'}{2l}, \text{ de donde } \frac{N'}{N} = \frac{V'}{V} \text{ y } V' = V\frac{N'}{N}.$$

Si se conoce V, la determinación del intervalo de los dos sonidos proporciona el valor de V'.

La velocidad del sonido en un gas depende también de la temperatura de este último. Por consiguiente, se podrá, por este método, estudiar las variaciones de esa velocidad en función de la temperatura.

Funciones respectivas del tubo y de la embocadura. — La embocadura sola emite un sonido muy complejo, con muchos armónicos, y poco musical. El tubo debe producir ondas estacionarias, que sólo se forman para valores bien determinados de la frecuencia del sonido; selecciona, pues, una de las frecuencias, que corresponde al establecimiento de esas ondas estacionarias en la columna de aire, reforzándola por un fenómeno de resonancia, y debilita los otros sonidos que emite, lo que explica que lo que determina la altura del sonido son solamente las dimensiones del tubo.

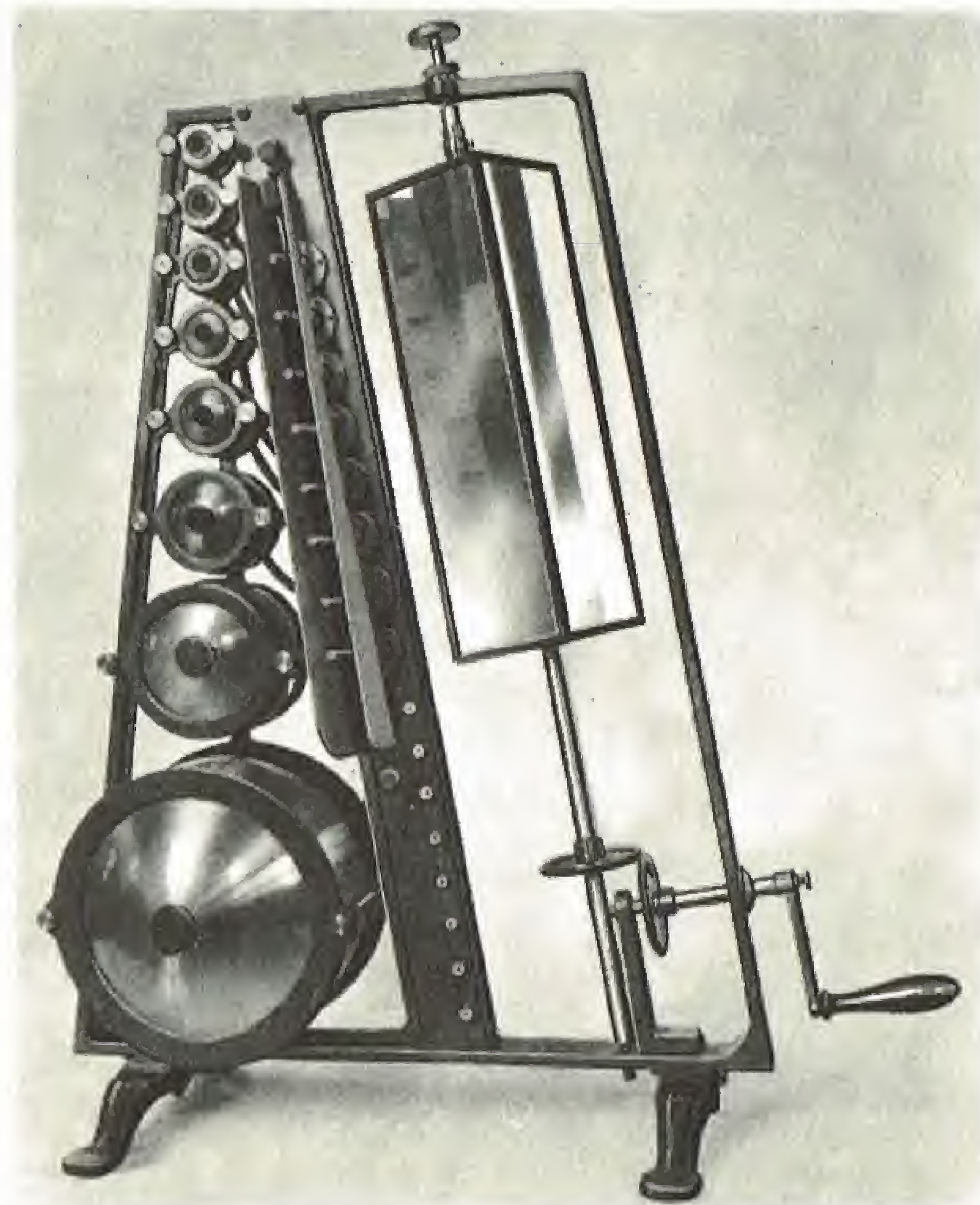
Instrumentos de música que utilizan tubos. — Los órganos están compuestos por un gran número de tubos, a los que sólo se les hace emitir sonidos fundamentales. El timbre del sonido que da un tubo se obtiene emitiendo simultáneamente por medio de otros tubos, que dan cada uno su sonido fundamental, ciertos armónicos particulares del primer sonido; es un instrumento de gran volumen, ya que exige varios tubos por nota. Puede utilizarse un instrumento que tenga un solo tubo y cuyas características se hacen variar. En el trombón de varas y en la trompeta de pistones, se hace que su longitud varíe. En la flauta, clarinete, etc., los orificios que se pueden abrir o cerrar a lo largo del tubo hacen que varíe el sistema de ondas estacionarias y, por consiguiente, la altura del sonido emitido. Por último, ciertos instrumentos, como la trompa o la corneta, constan de un tubo de características fijas y sólo pueden emitir el sonido fundamental que les corresponde y sus armónicos.

Resonancia

Definición general. — Cuando un péndulo oscila en el aire, la amplitud de sus oscilaciones disminuye poco a poco a causa del frotamiento con el aire, que absorbe energía. Lo mismo ocurre con la amplitud de las vibraciones de una fuente sonora, y esta disminución de amplitud se manifiesta por una disminución de la intensidad del sonido emitido.

Para mantener constante la amplitud de las oscilaciones de un péndulo o la intensidad de un sonido emitido por una fuente, es necesario proporcionar energía capaz de compensar las pérdidas debidas a los frotamientos. Pero la velocidad de un punto de vibración cambia de sentido dos veces por período, y para aumentar la energía cinética de este punto hace falta que la fuerza que lo mantiene en el momento en que actúa se ejerza en el mismo sentido de la velocidad: esta fuerza deberá, por consiguiente, estar acordada con el movimiento que tiene que sostener.

Cuando el amortiguamiento es pequeño, un aporte mínimo de energía puede bastar para mantener constante la amplitud de las vibraciones



Serie de resonadores provistos de cápsulas manométricas y acompañados de un prisma de espejos giratorios que permiten analizar un sonido (Conservatorio de Artes y Oficios de París)

e incluso para aumentarlas, siempre que este aporte esté convenientemente concertado; en este caso, se dice que existe resonancia.

Dicha resonancia se produce, por ejemplo, cuando se lanza progresivamente un balancín mediante impulsiones ritmadas con sus oscilaciones; puede también producirse bajo la influencia del golpear rítmico de una tropa que marca el paso sobre un puente, si la cadencia del paso corresponde exactamente al período de oscilación propia del puente.

Resonancia acústica. — Las vibraciones que una fuente sonora comunica al aire pueden amplificar las vibraciones de una fuente cercana, o incluso provocarlas si los períodos de ambas fuentes son iguales o múltiplos enteros uno de otro.

Si se colocan, por ejemplo, dos cuerdas idénticas, a la misma tensión y de la misma longitud, una al lado de otra, y se hace vibrar una de ellas, se comprueba que la otra también entra en vibración.

Coloquemos ante la abertura de una probeta de pie un diapasón en vibración; si el sonido emitido por el tubo constituido por la probeta es más grave que el del diapasón, el tubo no emite sonido; vertiendo progresivamente agua en el tubo para disminuir su longitud, se comprueba que, en cierto momento, el tubo emite el mismo sonido que el diapasón, y que continúa emitiéndolo cuando se aleja el diapasón.

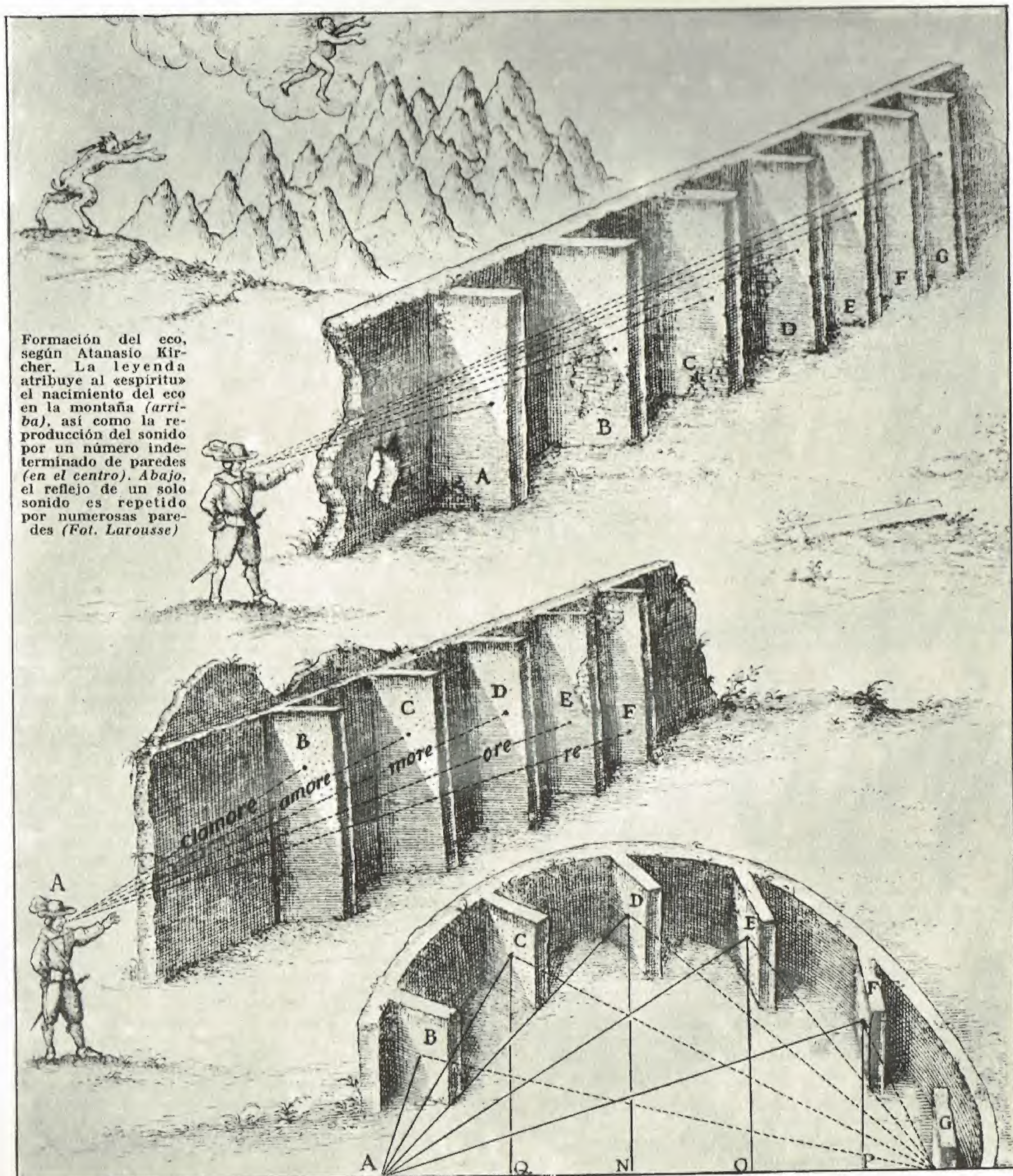
Resonadores. — Los resonadores son cavidades cuyo aire entra en vibración, poco amortiguada, para una o varias frecuencias bien determinadas. Los tubos sonoros son, en particular, resonadores para los sonidos que son capaces de emitir.

Los resonadores se utilizan para reforzar el sonido emitido por una fuente; colocando, por ejemplo, un diapasón sobre una caja de resonancia afinada con el sonido que emite el resonador, se aumentará su intensidad.

Ciertos resonadores, como los resonadores esféricos, sólo entran en vibración para un solo sonido, y entonces se les utiliza para analizar los sonidos complejos, es decir, para determinar en esos sonidos la presencia de determinados armónicos.

Las cajas de resonancia de los instrumentos de música deben, en cambio, ser muy poco selectivas, de forma que no refuercen desigualmente ciertos sonidos o ciertos armónicos.

La boca, gracias a las formas diferentes que puede adoptar, actúa como resonador de los diferentes sonidos de la voz.

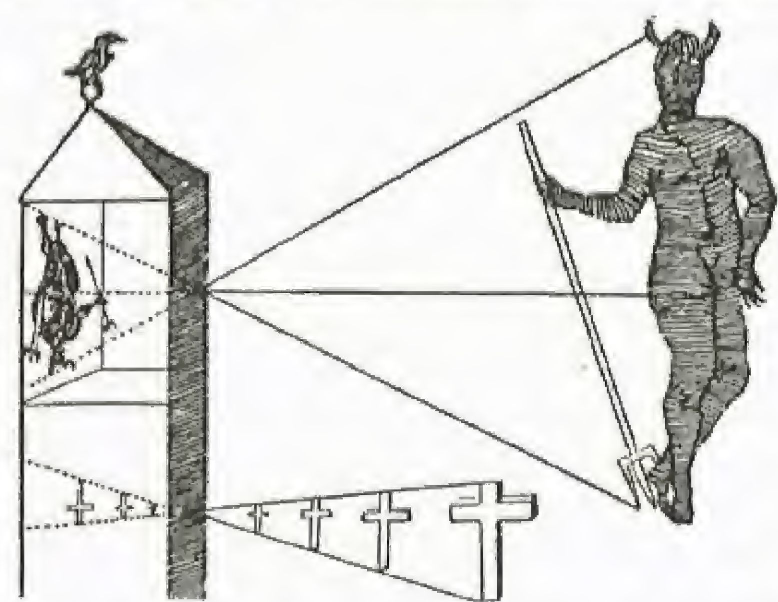


Formación del eco, según Atanasio Kircher. La leyenda atribuye al «espíritu» el nacimiento del eco en la montaña *(arriba)*, así como la reproducción del sonido por un número indeterminado de paredes *(en el centro)*. *Abajo*, el reflejo de un solo sonido es repetido por numerosas paredes *(Fot. Larousse)*

Tiendas de ópticos y de vendedores de gafas en el siglo XVI, grabado de Jean Collaert, según Jean Strada (Biblioteca Nacional, Paris) [*Fot. Larousse*]

Óptica

Reseña histórica. — Los pensadores de la Antigüedad hicieron hipótesis muy diversas sobre la naturaleza de la luz (v. TEORÍA DE LA LUZ, pág. 102): sus nociones sobre los fenómenos luminosos eran menos primivas que sobre la electricidad o el magnetismo. La escuela de Platón descubrió la propagación rectilínea de la luz y la igualdad entre los ángulos de incidencia y de reflexión. **Euclides** escribió, en el año 320 antes de J. C., una *Óptica* y una *Catóptrica*, donde alude a los efectos de la refracción. **Ptolomeo** llegó casi a descubrir la ley de refracción, midiendo la desviación del rayo cuando pasa del aire al agua o al vidrio.



Formación de imágenes en la cámara obscura (del *Oculus sive fondamentum opt cum*, del padre Scheinez [1619])

Como instrumentos de óptica, en la Antigüedad sólo se conocían los *espejos:* espejos de bronce de la época de Moisés, espejos planos de metal o de obsidiana, espejos de plata de los romanos, espejos cóncavos de Arquimedes.

En el siglo XI, el árabe Al Hazen emitió algunas ideas acertadas sobre la propagación de la luz. En el siglo XIII, **Vincent de Beauvais** (muerto un poco antes de 1264) habla de espejos azogados con plomo, y **Raimundo Lulio** (1235-1315) descubrió los procedimientos para fabricarlos.

Salvino degli Armati, noble florentino, inventó las *gafas* en 1317.

En el siglo XVI, el napolitano **Porta** (1541-1615) perfeccionó la *cámara obscura* ya mencionada por **Leonardo de Vinci** (1452-1519), y conocida desde el siglo XII, e inventó la linterna mágica.

A fines del siglo XVI, **Zacarías Janse,** o **Jansen,** inventó el *microscopio.* A partir del siglo XVII empieza verdaderamente a progresar el estudio de la luz. **Gassendi** desarrolla el sistema de **Demócrito,** que consideraba la luz como formada de corpúsculos muy tenues lanzados por cuerpos luminosos; **Descartes,** en su *Dióptrica* (1637), establece la ley de la refracción, llamada de los *senos,* así como la teoría del arco iris. Descubre después las propiedades de las *lentes,* encontrando su *aberración* de esfericidad; **Newton,** más tarde, descubre la aberración de refractibilidad. Al mismo tiempo se descubren los instrumentos de óptica que utilizan la reflexinó y la refracción de la luz: el telescopio, los anteojos y el microscopio.

Lippershey, óptico de Middelbourg, fabrica el primer *anteojo de aproximación* de objetivo convexo y de ocular cóncavo (1606). **Galileo** construye el *anteojo* que lleva su nombre (1609). **Kepler,** en la misma época, concibe en su *Dióptrica* la primera idea del *anteojo astronómico.* En 1646, el padre **Kircher** construye la *linterna mágica* concebida por Porta, que fue la primera linterna de proyección.

A estos descubrimientos capitales, que ampliaron considerablemente el campo de la óptica geométrica, se añadieron los primeros descubrimientos de la óptica física, absolutamente desconocida hasta entonces.

Grimaldi descubre los fenómenos de *difracción,* hacia 1633; **Boyle** y **Hooke** (1633-1703) [1664], y después **Newton** (1675), estudian las *franjas coloreadas* debidas a las láminas delgadas. El mismo Newton descubre, en 1668, la *dispersión* de la luz *(prisma);* **Bartholin** (1625-1698) descubre la *doble refracción* (1669) y **Huygens** la *polarización,* que explica mediante la teoría ondulatoria (v. más adelante). **Roemer** (1644-1710) dedujo la *velocidad de la luz* observando los satélites de Júpiter; Newton construyó el *telescopio de espejo* (1672) y **James Gregory** (1638-1675) explicó la composición de la luz blanca.

En la primera mitad del siglo XVIII, **Bouguer** (1698-1758) sienta las bases de la *fotometría.* En 1755, **Klingenstierna** (1698-1765) muestra las diferentes dispersiones que poseen los cuerpos. **Euler, Clairaut** y **d'Alembert** estudian las condiciones matemáticas necesarias para obtener instrumentos *acromáticos,* y **Dollond** (1706-1761) consigue construirlos (1757).

Por la misma época, **Lieberkuhn** concibe el *microscopio solar* (1748) y **Gravesande** (1688-1742) el *helióstato*. **Hadley** (1682-1744) descubre el *sextante* en 1731.

Thomas Young (1773-1829) establece (1801-1803) el principio de las *interferencias;* **Malus** (1775-1812) demuestra que la luz reflejada bajo cierto ángulo está polarizada. **Cauchy,** en 1812, descubre la *polarización cromática;* **Fresnel** (1788-1827), la *polarización circular;* **Biot** (1774-1862) observa la *polarización rotatoria* y construye los primeros *sacarímetros;* **Faraday** descubre la *polarización rotatoria magnética,* y **Maxwell** establece la *teoría electromagnética de la luz. Kirchhoff* y **Bunsen** crean el *análisis espectral* (1885). En 1884, **Violle** (1841-1923) hizo que se adoptara el patrón luz (v. FOTOGRAFÍA Y RADIACIÓN [págs. 56 y 226] y ÓPTICA FÍSICA [pág. 102]).

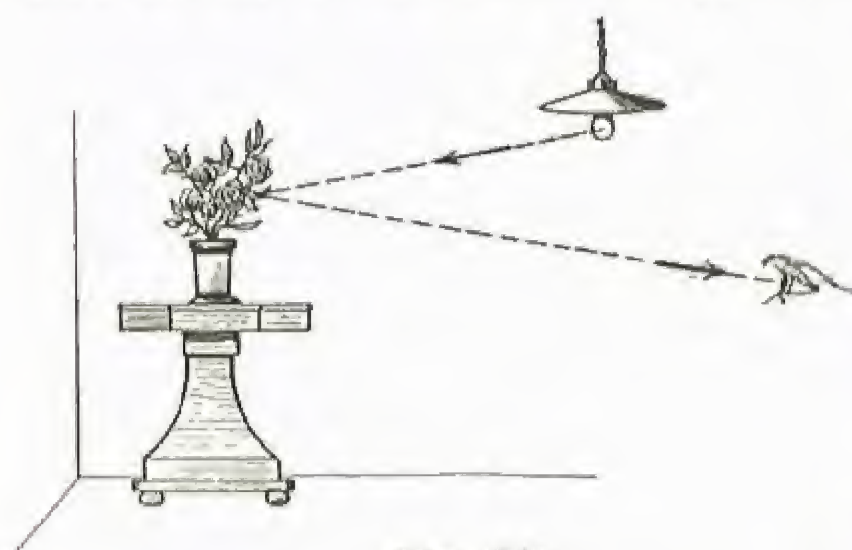
Propagación rectilínea de la luz

Fuentes luminosas, difusión de la luz. Propagación rectilínea. Sombras propias, sombras proyectadas, penumbras. Fases de la luna. Eclipses de luna. Eclipses de sol. Cámara obscura

Fuentes luminosas, difusión de la luz. — Cuando se enciende una lámpara en un cuarto durante la noche, la luz se propaga a todo el cuarto, permitiéndonos distinguir los objetos que en él se encuentran. Análogamente, durante el día, la luz emitida por el sol llena todo el espacio. El sol y las diferentes lámparas son *fuentes de luz.*

Si entre nuestro ojo y una fuente luminosa se interpone un cartón espeso, un libro o un objeto de madera o de metal, la luz es detenida completamente por este obstáculo, por ser opacos esos diferentes cuerpos. Si se repite la experiencia con una hoja de papel delgada, con un vidrio esmerilado, con una taza de porcelana fina, percibiremos luz sin distinguir, a pesar de ello, la propia fuente; estos cuerpos no detienen completamente la luz y la difunden: se denominan *translúcidos.* Si entre el ojo y la lámpara se coloca un vidrio, una hoja de mica, una botella llena de un líquido como agua, alcohol, aceite, vino, etcétera, continúa viéndose la fuente luminosa. Estos cuerpos: el vidrio, el agua, el alcohol, etc., se denominan cuerpos *transparentes.*

Los diferentes objetos se dejan atravesar mejor o peor por la luz. También podemos distinguirlos cuando no se interponen entre nuestros ojos y las fuentes luminosas, debido a que envían la luz que reciben en todas las direcciones: *difunden* o *devuelven* la luz, que nos llega indirectamente (*figura* 214). Las paredes, los techos y los suelos difunden gran parte de la luz emitida por las lámparas o que entra por las ventanas; análogamente, las nubes, y las moléculas del aire atmosférico difunden en todas las direcciones la luz del sol. Estas difusiones y reflexiones múltiples son las que nos dan la impresión de que la luz se extiende por el espacio y baña los objetos en él situados.


Fig. 214

Propagación rectilínea. — La luz emitida por las diferentes fuentes atraviesa espacios más o menos grandes antes de tropezar con objetos de diferentes opacidades. ¿Cómo se propagará?, ¿qué camino recorrerá? Para saberlo, realicemos la experiencia siguiente:

Tomemos como fuente luminosa la lámpara eléctrica de un faro de automóvil, cuyo filamento es muy corto, de forma que, por ser esta fuente muy pequeña y muy intensa, puede compararse con un punto luminoso: se trata de una fuente puntual. Interpongamos entre este punto y una pared o una pantalla blanca un objeto opaco: toda la región del espacio situada detrás de este objeto deja de recibir luz, se encuentra en la sombra, y vemos sobre la pantalla una sombra obscura muy delimitada, cuyo contorno puede trazarse con un lápiz. Si se extiende un hilo entre la lámpara apagada y cualquier punto del contorno así trazado, se comprueba que toca el cuerpo opaco en un punto, es decir, que le es tangente. Por consiguiente, la luz se ha propagado en línea recta y el hilo tenso representa un rayo de luz.

Otra experiencia nos da el mismo resultado: perforemos dos pedazos de cartón opaco: se obtienen así dos diafragmas O y O'. Dispongamos estos diafragmas uno detrás de otro, de forma que pueda verse la llama de un bujía encendida. Podremos conseguirlo después de algunos tanteos; soplemos entonces la llama e introduzcamos a través de O y O' una regla larga, delgada y bien recta (*fig.* 215): se observa que puede deslizarse de forma que toque la mecha. Por consiguiente, es evidente que la luz se desplaza en línea recta y que los rayos emitidos por una fuente luminosa son rectilíneos. Los rayos que atraviesan los diafragmas constituyen lo que se llama un *haz,* que puede ser muy estrecho.

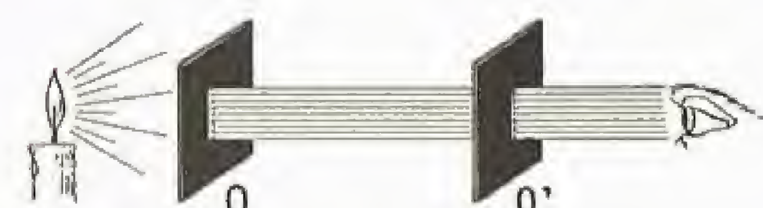


Fig. 215

Sin tratar de averiguar cuál es la naturaleza íntima de la luz, ni el mecanismo de su emisión o de su propagación, se sentará, por principio, que, en un espacio homogéneo, la luz se desplaza en línea recta.

El estudio de las consecuencias del principio de la propagación rectilínea de la luz constituye la *óptica geométrica.*

Sombras propias, sombras proyectadas, penumbras. — Consideremos de nuevo la experiencia consistente en iluminar un cuerpo opaco C de forma cualquiera por una fuente luminosa puntual S. El punto S es el vértice de un cono cuyos rayos son tangentes al cuerpo. Los puntos situados dentro del cono y detrás del objeto opaco no reciben luz alguna: se encuentran en el cono de sombra proyectada. La intersección de este cono con una pantalla cualquiera es una zona obscura, la *sombra proyectada.* El cono es tangente al cuerpo C según una línea que separa la parte iluminada de la que está en sombra (*fig.* 216).

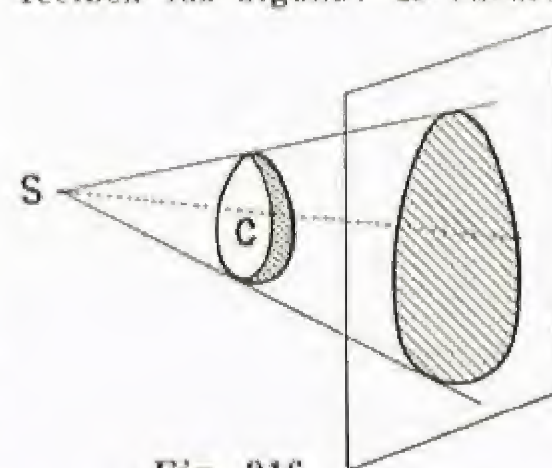


Fig. 216

El fenómeno es más complicado cuando la fuente luminosa, en vez de ser puntual, tiene dimensiones apreciables en comparación con los objetos iluminados. Tomemos como ejemplo una lámpara encerrada en un globo opalino o esmerilado (*fig.* 217). Las sombras son más suaves, sus contornos no son tan precisos, y se pasa gradualmente de la obscuridad a la plena luz. Se puede, en efecto, trazar dos conos tangentes —llamados también circunscritos— a la fuente S y al objeto opaco C.

Sigue existiendo un cono de sombra proyectada en el que no penetra la luz, pero los puntos situados entre ambos conos están parcialmente iluminados y no ven completamente la fuente; se encuentran situados en la *penumbra.*

Los dos conos determinan sobre el propio cuerpo dos curvas de contacto que definen tres zonas: la primera, de iluminación plena, desde la cual se ve enteramente la fuente; la segunda, de penumbra, situada entre ambas curvas, en la cual la iluminación disminuye, sin que pueda verse la fuente enteramente y, por último, la zona de sombra, desde la cual la fuente es invisible.

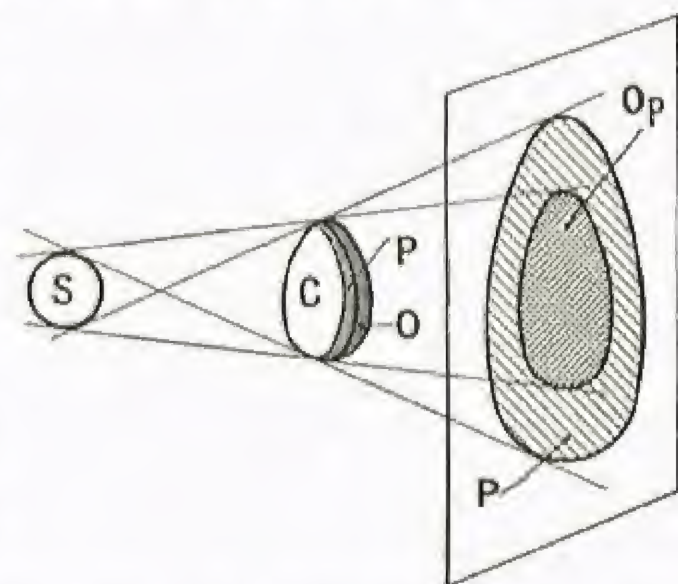


Fig. 217.—O. Sombra propia; Op. Sombra proyectada; P. Penumbra

Fases de la luna. — La luna gira alrededor de la tierra en veintiocho días, aproximadamente; recibe la luz del sol y sólo son visibles desde la tierra las partes por él iluminadas. La figura muestra las formas aparentes de la luna, denominadas fases, según las diferentes posiciones de este astro sobre su órbita (*figura* 218).

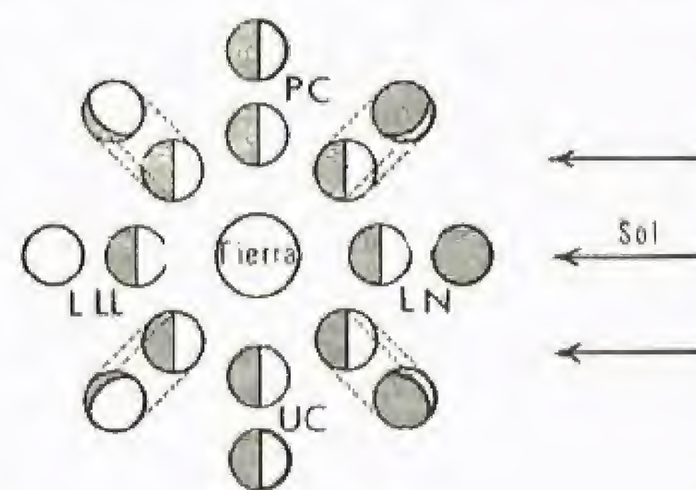


Fig. 218

Eclipses de luna. — El sol, que ilumina la tierra, produce detrás de ella un cono de sombra; como la distancia entre los dos astros es muy grande, la zona de penumbra es muy reducida. Puede ocurrir que la luna, en el cuarto de luna llena, penetre completa o parcialmente en este cono; entonces deja de ser completamente visible y se dice que hay eclipse total o parcial de luna (*fig.* 219).

Eclipses de sol. — La luna, iluminada por el sol, arrastra también tras ella un cono de sombra. Puede ocurrir que este cono de sombra o su prolongación, alcance la tierra durante la luna nueva. En esos puntos el sol es invisible, y hay eclipse. Cuando es la prolongación del cono de sombra la que encuentra la tierra, es fácil darse cuenta en la figura que una parte del sol es todavía visible en forma de anillo: el eclipse es anular (*fig.* 220).

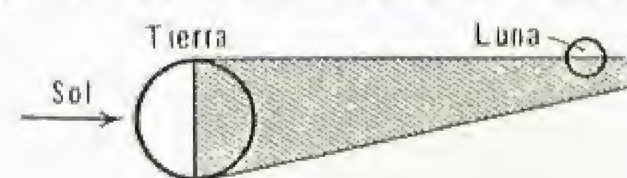


Fig. 219

Cámara obscura. — En una caja paralelepipédica de paredes opacas, reemplacemos uno de sus lados por un vidrio esmerilado y haga-

mos una abertura muy pequeña en la pared opuesta; el aparato así constituido se denomina "cámara obscura". Esta denominación se explica porque en otras épocas —hacia los siglos XII o XIII— este instrumento era en realidad una habitación cuyas aberturas estaban todas cerradas salvo un orificio hecho en una persiana de madera. El observador, situado dentro de esta verdadera cámara obscura, miraba la pared situada en la parte opuesta del orificio, que desempeñaba el mismo papel que la pantalla de vidrio esmerilado.



Fig. 220.—Eclipse total de sol y eclipse anular de sol

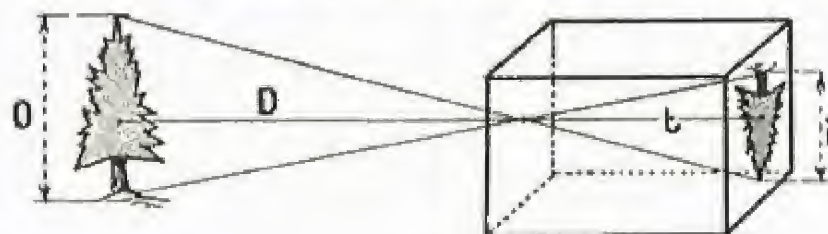


Fig. 221

Cuando se dirige este aparato hacia una persona o hacia un paisaje bien iluminado, se observa en el vidrio esmerilado una imagen invertida (*fig.* 221). Un punto cualquiera de la persona que difunde la luz en todas las direcciones, o un haz muy estrecho de luz que penetra en el instrumento, produce una pequeña mancha luminosa sobre el vidrio. La imagen que se observa es tanto más clara —aunque menos iluminada— cuanto menor es la abertura. En cuanto a su tamaño, depende a la vez de la distancia del objeto a la abertura y de la dimensión de la cámara obscura. Si llamamos *o* la longitud del objeto, *i* la de la imagen, D la distancia del objeto y *t* la dimensión del cuarto, se tendrá, en virtud de la semejanza de triángulos,

$$i = o \cdot \frac{t}{D}.$$

Por otra parte, los puntos situados encima de la abertura producen pequeñas manchas luminosas debajo de ella, produciendo una imagen invertida, cuya parte izquierda corresponde a la derecha del individuo.

Por último, es fácil darse cuenta de que si el orificio es muy pequeño su forma no influye: puede ser redondo, cuadrado, etc. La pantalla de observación ya no es vertical, sino que está colocada oblicuamente, y la imagen observada se deforma, convirtiéndose un círculo, por ejemplo, en una elipse. De esta forma atraviesan los rayos solares los intervalos estrechos situados entre las hojas de los árboles y dibujan sobre el suelo manchas elípticas.

Reflexión de la luz

Espejos planos: Espejos. Imágenes producidas por un espejo plano. Propiedades de las imágenes producidas por los espejos planos. Campo de un espejo. Espejos paralelos. Espejos angulares. Caleidoscopio. Espejo triple. Espejo giratorio. Helióstatos. — **Espejos esféricos:** *Espejos cóncavos:* Estudio experimental. Teoría de los espejos cóncavos. Reflexión de rayos paralelos. Imagen de un punto. Fórmula de los espejos. Construcción gráfica de la imagen de un objeto. Imagen de un objeto en el infinito. Aumento lineal. Aplicaciones de los espejos cóncavos. *Espejos convexos:* Teoría de los espejos convexos. Aplicaciones de los espejos convexos. *Espejos parabólicos:* Medida de la longitud focal de un espejo esférico

Espejos planos

Espejos. — Cuando la luz tropieza con la superficie de un cuerpo cualquiera, es difundida parcial o totalmente en todas las direcciones posibles. No ocurre lo mismo cuando la superficie del cuerpo está perfectamente pulimentada. Entonces, la superficie devuelve el rayo luminoso en una dirección única que depende de la posición del rayo con respecto a esta superficie: se dice que el rayo se ha reflejado, y que la superficie reflectora es un *espejo*. La forma más sencilla de los espejos es la de un plano. La naturaleza nos ofrece un ejemplo en la superficie de los lagos o de las aguas tranquilas, y el hombre, desde las épocas más remotas, ha construido espejos de metal pulimentado. Mucho más tarde se fabricaron espejos de vidrio o de cristal, que reflejaban la luz mediante una capa de amalgama de estaño (estaño disuelto en el mercurio, estaño de los espejos) y solamente desde hace menos de un siglo se ha reemplazado el estaño por una capa delgada de plata depositada por vía química.

Es sabido que los cristales o espejos planos producen, de los objetos situados delante de ellos, imágenes semejantes a dichos objetos. Estudiando el mecanismo de la formación de estas imágenes llegaron los sabios de la Antigüedad al descubrimiento de las leyes de la reflexión, que se encuentran ya formuladas, por ejemplo, en el tratado de Euclides: la *Catóptrica* (300 años antes de J. C., aproximadamente).

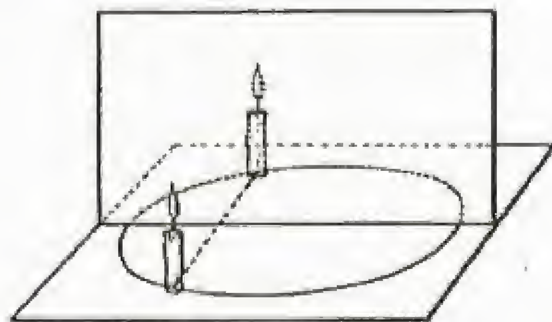


Fig. 222

Imágenes producidas por un espejo plano. — Tracemos un círculo y un diámetro en un plano horizontal (*fig.* 222) y dispongamos después verticalmente un espejo no plateado a lo largo del diámetro. Tomemos después dos bujías del mismo diámetro y de la misma longitud, una de las cuales se colocará en el círculo ante un espejo, que nos dará, por reflexión, su imagen. Procuremos entonces colocar la segunda bujía de forma que se superponga a la imagen observada en el espejo, lo que se logrará después de algunos tanteos, con tanta exactitud, que será imposible distinguir la segunda bujía de la imagen de la primera. La ilusión es tan perfecta que si se enciende la bujía situada ante el espejo, la segunda parecerá también encendida y el dedo que toca la mecha parecerá situado en la llama.

Cuando se ha obtenido esta coincidencia entre la segunda bujía y la imagen de la primera, se comprueba que la bujía número 2 está también situada en el círculo, en la intersección de la perpendicular trazada desde la bujía número 1 sobre el diámetro. Esta disposición es sólo la simetría con respecto a un plano —el del espejo— que se estudia en geometría. Se observa, además, que las distancias de las bujías al espejo son iguales, y que la imagen es también igual al objeto.

Dicho de otra forma, los rayos luminosos, después de reflejados por un espejo plano, parecen proceder de puntos del espacio situados detrás del espejo y simétricos del objeto. Un rayo luminoso trazado desde el punto A y que llega al espejo M en el punto I se refleja según IR, como si viniera del punto A′, sobre la perpendicular AH, tal como A′H = AH (*fig.* 223).

Tracemos en I la perpendicular IN, llamada también normal, al plano del espejo: el rayo AI se denomina rayo incidente. I es el punto de incidencia; el plano AIN, perpendicular al espejo y que contiene a la vez el rayo y la normal, se denomina plano de incidencia; el ángulo $\widehat{AIN}$ será el *ángulo de incidencia* $\widehat{i}$, mientras que el ángulo $\widehat{RIN}$, que forma el rayo reflejado y la normal, se denomina *ángulo de reflexión* $\widehat{r}$.

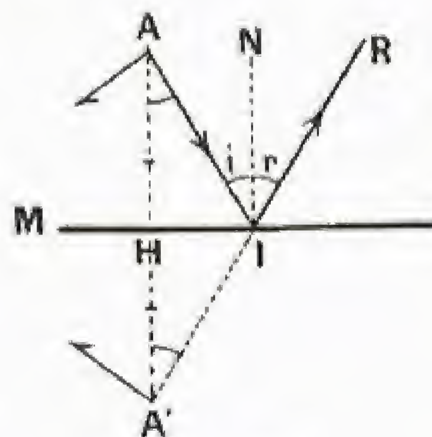


Fig. 223

Primera ley de la reflexión. Establecidas estas definiciones, se observa fácilmente en la figura que la perpendicular AHA′ se encuentra también en el plano de incidencia, que contiene, por consiguiente, el punto A′ imagen de A. *El rayo reflejado* A′IR, *que tiene dos de sus puntos* A′ *e* I *en el plano de incidencia, está contenido completamente en dicho plano:* es la primera ley de la reflexión.

Segunda ley de la reflexión. Los triángulos rectángulos AHI y A′HI, que tienen un cateto común HI y los otros dos lados iguales, AH = A′H, son iguales. Los ángulos $\widehat{HAI}$ y $\widehat{HA'I}$ son también iguales, pero los ángulos $\widehat{i}$ y $\widehat{HAI}$ son iguales por alternos internos, mientras que los ángulos $\widehat{r}$ y $\widehat{HA'I}$ son iguales por correspondientes; por consiguiente, *el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión*, que es la segunda ley de la reflexión.

En resumen: el rayo incidente y el rayo reflejado se encuentran en un mismo plano, normal a la superficie reflectora, y forman ángulos iguales con la normal a esta superficie en el punto de incidencia.

Propiedades de las imágenes producidas por los espejos planos. — Los rayos reflejados por los espejos planos parecen proceder de imágenes situadas detrás de dichos espejos: las imágenes carecen de existencia real, y se dice que son virtuales.

Consideremos ahora un rayo incidente RIA′ dirigido hacia A′: es detenido por el espejo en I y reflejado según IA, de forma que A puede también considerarse como una imagen, esta vez real, del objeto virtual A′.

El hecho de que la luz pueda circular a lo largo de los rayos luminosos, en ambos sentidos, sin que cambie de trayecto, es muy importante y constituye lo que se denomina *principio del retorno inverso de la luz.*

Se verá más adelante que en un sistema óptico cualquiera, una imagen y su objeto son conjugados, es decir, que si se coloca un objeto en el lugar en que se produciría la imagen, la nueva imagen se encuentra en el lugar en que estaba situado el objeto. Si rayos luminosos que convergen en el mismo punto son detenidos por un espejo plano, convergerán después de reflejados, formando un verdadero punto luminoso, que es entonces una imagen real.

Las imágenes producidas por los espejos planos tienen las mismas dimensiones que los objetos correspondientes, pero de ello no se deduce que sean iguales. El objeto y la imagen no pueden superponerse, pero son simétricos con respecto a un plano como lo son la mano derecha y la mano izquierda; como se sabe, no es posible introducir la mano derecha en un guante izquierdo, ni inversamente. Resulta, pues, que un texto escrito o impreso no puede leerse mediante reflexión en un espejo; pero si los rayos luminosos se reflejan nuevamente en un segundo espejo, la imagen sufre una segunda inversión; así, un texto se hace legible mediante dos reflexiones.

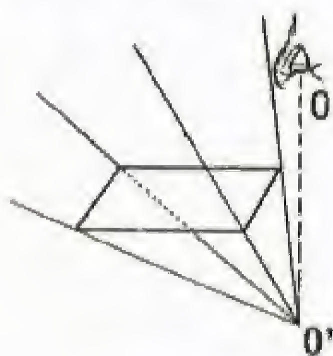


Fig. 224

Campo de un espejo. — Un espejo no da solamente la imagen de una parte restringida del espacio situado ante él; la experiencia muestra que esta porción, visible por reflexión, denominada campo del espejo, depende a la vez de la posición del observador y de las dimensiones del espejo. En efecto, los únicos rayos incidentes que penetran en el ojo O del observador, previa reflexión, son evidentemente los dirigidos hacia O′, imagen de O en el espejo. Los únicos objetos visibles en el campo del espejo son, pues, los que están situados en el interior del tronco de cono o de pirámide, de vértice O′, circunscrito al espejo (*fig.* 224).

Espejos paralelos. — Consideremos dos espejos planos M_1 y M_2 exactamente paralelos, cuyas caras reflectoras están orientadas hacia el objeto O situado entre ambos. El observador situado hacia A ve un número de imágenes tanto mayor cuanto más largos son los espejos (*fig.* 225).

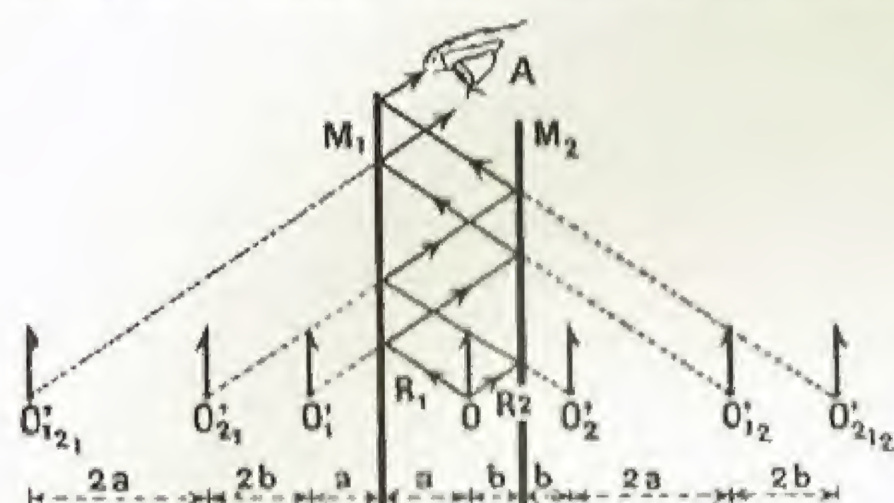


Fig. 225

En efecto, un rayo luminoso como el R_1 es reflejado por el espejo M_1 como si procediera de la imagen O'_1 (simétrica de O con respecto al plano M_1); después encuentra el segundo espejo M_1 sobre el cual se refleja de nuevo como si procediera de la imagen O'_1 producida por M_2, es decir, de $O'_{1,2}$. También este último rayo se refleja una vez sobre el primer espejo, tomando una dirección que parece proceder de la imagen de $O'_{1,2}$ en el espejo M_1 y, por consiguiente, de $O'_{1,2,1}$; una nueva reflexión puede producirse sobre M_2, etc. Así se justifica la existencia de una serie de imágenes O'_1, $O'_{1,2}$, $O'_{1,2,1}$, etc., pero existe otra segunda serie. En efecto, un rayo como el R_2, que incidiera primeramente sobre el espejo M_2, se reflejaría como si procediera de la imagen O'_2 del objeto O. Al encontrar después el espejo M_1, se reflejaría como si procediera de la imagen $O'_{2,1}$, simétrica de O'_2 con respecto al plano M_1 y caería nuevamente sobre el espejo M_2, que lo devolvería como si procediera de la imagen $O'_{2,1,2}$, etc.

Todas estas imágenes están alineadas sobre una misma recta perpendicular a los dos espejos que pasan por O. Es fácil ver que están dispuestas alternativamente de cara y de espalda, y que las distancias entre ellas son alternativamente $2a$ y $2b$,, si a y b son las distancias del objeto O a los espejos M_1 y M_2, respectivamente.

Cuando los dos espejos no son exactamente paralelos, las imágenes no están ya alineadas sobre una misma recta, sino sobre un círculo de radio más o menos grande; esta observación permite ajustar el paralelismo de los espejos.

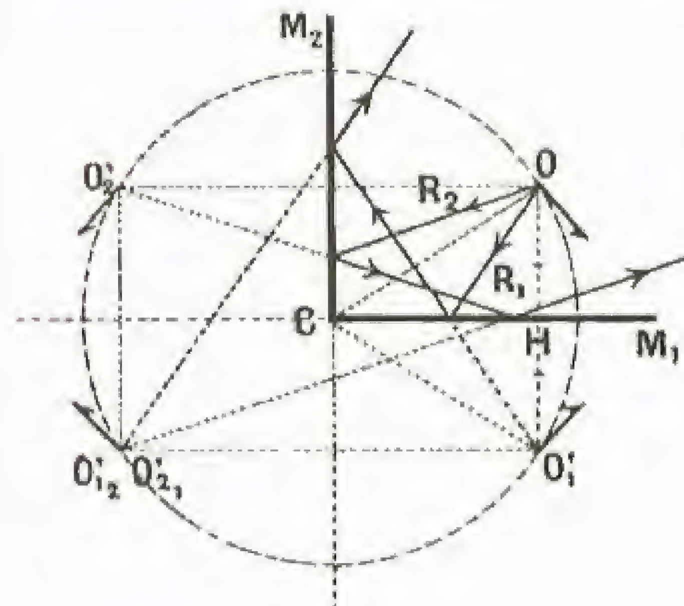


Fig. 226

Espejos angulares. — Supongamos ahora que los espejos M_1 y M_2 sean rectangulares: encontraremos, como en el caso anterior, dos series de imágenes, pero en número muy limitado, debido a que: 1°, un rayo luminoso trazado desde el objeto O no puede sufrir más que dos reflexiones, en los casos más favorables, y 2°, ciertas imágenes coinciden.

El rayo luminoso R_1 se refleja sobre M_1 (*fig.* 226) como si procediera de la imagen O'_1; después de encontrar M_2, es reflejado en dirección de la imagen $O'_{1,2}$, y ya no puede sufrir otras reflexiones antes de ser recibido por el observador. Un segundo rayo como el R_2, que se refleja primeramente en M_2 procedente de la imagen O'_2, cae después sobre el espejo M_1, por el que es reflejado de nuevo como si procediera de la imagen $O'_{2,1}$, simétrica de O'_2 con respecto al plano M_1. Es evidente que las imágenes $O'_{1,2}$ y $O'_{2,1}$ coinciden en posición y sentido, y que, además, las tres imágenes del objeto están situadas sobre un mismo círculo de centro C y radio CO. Si el ángulo que forman los espejos no es exactamente de 90°, las dos imágenes $O'_{1,2}$ y $O'_{2,1}$ ya no coinciden; su distancia es tanto mayor cuanto más difiere de 90° el ángulo que forman los espejos. Así se tiene un procedimiento cómodo para ajustar la perpendicular de dos espejos.

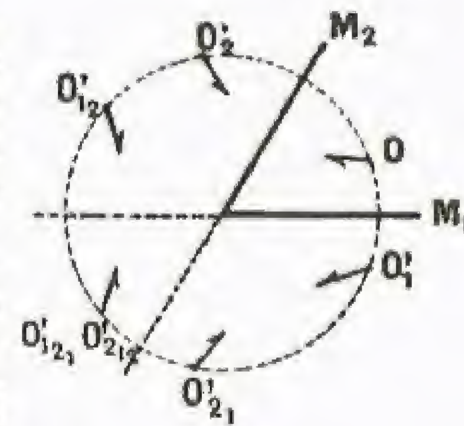


Fig. 227

Consideremos el caso en que el ángulo de los espejos es de 60°. La figura 227 muestra que se observan entonces cinco imágenes situadas sobre un círculo que pasa por el objeto. De una manera general, si el ángulo de los espejos a es $1/n$ de circunferencia, el número de imágenes es $n - 1$. Por ejemplo, para el ángulo de 45°, que es 1/8 de circunferencia, habrá $8 - 1 = 7$ imágenes.

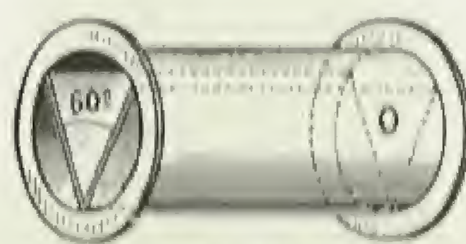


Fig. 228

Caleidoscopio. — Este instrumento, debido al físico inglés Brewster (1818), es una aplicación de los espejos angulares. En un cilindro bastante largo se introducen dos espejos, que forman entre sí un ángulo de 60°. Uno de los fondos del tubo cilíndrico está constituido por un vidrio deslustrado y otro transparente, entre los cuales se han colocado pedacitos de vidrios de color, barbas de plumas, etc., cuyas posiciones relativas pueden variar sacudiendo el instrumento o golpeando ligeramente el tubo. El observador mira los objetos y sus imágenes a través de un agujero pequeño perforado en el otro fondo del tubo. Las imágenes, a causa de su simetría, forman motivos decorativos susceptibles de interesar a los dibujantes (*fig.* 228).

Espejo triple. — Se disponen tres espejos planos, perpendiculares entre sí, de forma que constituyan un triedro trirrectángulo. (En una habitación, dos paredes contiguas y el suelo forman un triedro trirrectángulo.)

Un rayo luminoso que incida en uno de los tres espejos sufre varias reflexiones, siendo finalmente devuelto, paralelamente a su dirección primitiva, hacia la fuente luminosa. Esta propiedad no depende de la orientación del triedro con respecto al rayo (*fig.* 229).

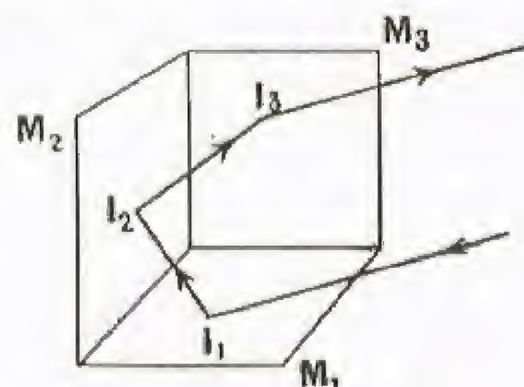


Fig. 229

Este sistema de espejos se utiliza en las señalizaciones. Una de las estaciones está dotada de un proyector orientado hacia el espejo triple, colocado en la segunda estación. Los rayos luminosos, después de sufrir una reflexión, regresan hacia el proyector y sólo pueden ser recogidos por los vigías de la primera estación. Los señalizadores de la segunda estación corresponden con la primera estación maniobrando ante el espejo triple una pantalla opaca con arreglo a un código convenido; los de la primera estación pueden responder maniobrando una pantalla situada ante su proyector.

Espejo giratorio. — Cuando gira un espejo plano, los rayos reflejados son desviados y la imagen se desplaza; se estudiará sólo el caso más simple, que es también el más importante: el de un espejo que gira alrededor de un eje situado en su plano.

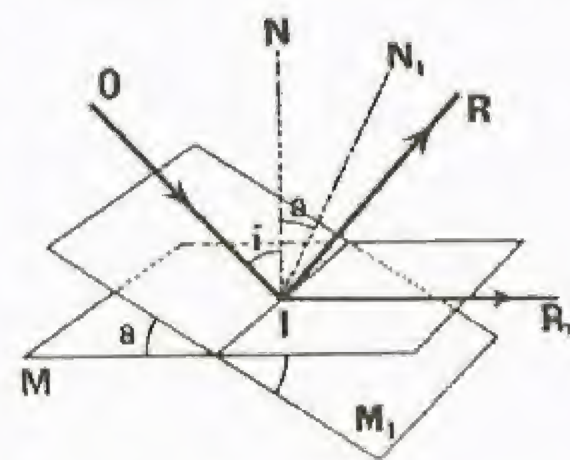


Fig. 230

Cuando el espejo M gira del ángulo $\widehat{a}$ alrededor del eje I, el rayo reflejado IR toma la dirección IR_1; obtengamos el valor del ángulo $\widehat{RIR_1}$. La normal IN en el punto de incidencia ha girado también el ángulo $\widehat{a}$ y se encuentra en IN_1: el ángulo de incidencia $\widehat{i} = \widehat{OIN}$ se habrá convertido en el $\widehat{OIN_1} = \widehat{i} + \widehat{NIN_1} = \widehat{i} + \widehat{a}$; con arreglo a la ley de la reflexión, este valor es también el del nuevo ángulo $\widehat{r_1} = \widehat{N_1IR_1}$, pero

$$\widehat{N_1IR_1} = \widehat{NIR_1} - \widehat{NIN_1} = \widehat{NIR} + \widehat{RIR_1} - \widehat{NIN_1}$$

o

$$\widehat{i} + \widehat{a} = \widehat{i} + \widehat{RIR_1} - \widehat{a},$$

es decir

$$\widehat{RIR_1} = 2\widehat{a} \qquad (\textit{fig. } 231).$$

Así, pues, el rayo reflejado gira de un ángulo exactamente doble del del espejo. Más adelante se verá la aplicación de este resultado a la medida de ángulos.

En cuanto a la imagen O′ del objeto O, es arrastrada por la rotación del espejo hacia O'_1. Como las distancias O′I y O'_1I son ambas iguales a OI, resulta que la imagen O′ se desplaza sobre una circunferencia de centro I y de radio IO (*fig.* 231).

Cuando se desplaza un espejo plano permaneciendo paralelo a sí mismo (traslación), por ejemplo de M a M_1, muestra la figura que la imagen del punto O, que va desde O′ a O'_1, se desplaza el doble: $O'O'_1 = 2MM_1$ (*fig.* 232).

Helióstatos. — Entre las numerosas aplicaciones de los espejos planos pueden citarse los helióstatos. Los rayos solares muy intensos pueden utilizarse con provecho para iluminar instrumentos de física o de observación. Para ello basta con enviarlos, mediante un espejo, en la dirección escogida, pero es necesario modificar continuamente la posición de este espejo para compensar el desplazamiento del sol en el horizonte, desplazamiento que varía con la hora y la latitud del lugar. Se han construido instrumentos denominados *helióstatos* en los cuales un mecanismo accionado por un pequeño reloj mantiene los rayos reflejados por el espejo en una dirección fija. (El grabado "hulla de oro", en la lámina fuera de texto Energía, representa el helióstato de la fábrica solar de Mahdi, cerca de El Cairo.)

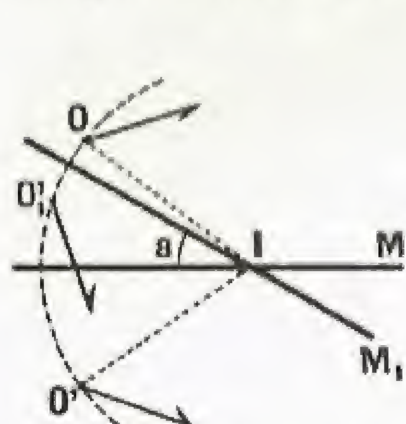


Fig. 231

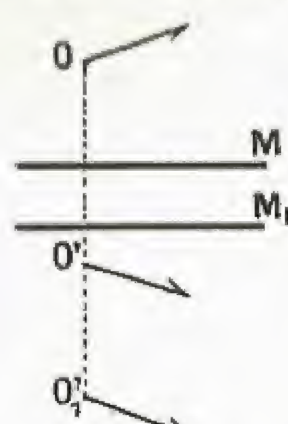


Fig. 232

Espejos esféricos

Definiciones. Entre los espejos cuya superficie reflectora es curva, los más sencillos de construir son los espejos esféricos. Son casquetes esféricos de metal o de vidrio plateado, que pueden clasificarse en dos grupos, según que la superficie reflectora sea hueca o bombeada: espejos cóncavos y espejos convexos, respectivamente. Se denomina *eje óptico principal* la recta que pasa por el centro C de la esfera, es perpendicular al plano base del casquete y atraviesa el espejo en el polo o vértice S (*fig.* 233).

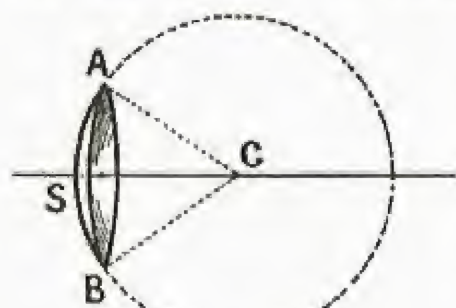


Fig. 233

Espejos cóncavos

Estudio experimental. — En el estudio de estos espejos seguiremos la misma marcha que en el de los espejos planos, empezando por determinar experimentalmente la naturaleza, posición y magnitud de sus imágenes.

La *abertura* del espejo o su *diámetro* es el diámetro AB del círculo base; su *abertura angular* es el ángulo $\widehat{ACB}$. Nos limitaremos en nuestro estudio a los espejos de pequeña abertura, con diámetro inferior a la mitad del radio de la esfera, que corresponde a un ángulo menor que 20 a 25°.

1° Tomemos un objeto muy luminoso situado a gran distancia del espejo; suele decirse en este caso que el objeto está infinitamente alejado del espejo o que está situado en el infinito (para ello basta que el objeto esté situado a una distancia comprendida entre 50 a 100 veces el radio de curvatura del espejo). Podrá utilizarse para ello una lámpara eléctrica. Tratemos de recoger los rayos reflejados sobre una pequeña pantalla de cartón blanco, y comprobaremos que a la mitad de la distancia entre el centro del espejo y su vértice se tiene una imagen muy clara, pero muy *pequeña, e invertida*, de la lámpara y de los objetos situados a su alrededor; el máximo de nitidez se obtiene cuando la pantalla está situada perpendicularmente al eje óptico que pasa por la lámpara. Este plano, en el que se encuentran las imágenes de todos los puntos infinitamente alejados, se denomina *plano focal* del espejo.

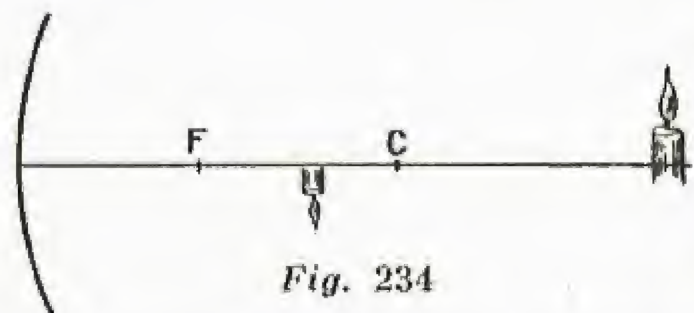


Fig. 234

2° Aproximemos el objeto al espejo, de forma que la imagen permanezca al principio en el plano focal; después, a medida que el objeto se aproxima suficientemente, la imagen se aleja lentamente del espejo y se aproxima al objeto.

La imagen en la pantalla es siempre invertida, y aumenta cada vez más (*fig.* 234).

3° Cuando el objeto llega al plano frontal (perpendicular al eje óptico) que pasa por el centro C del espejo, la pantalla donde se recoge la imagen debe estar también colocada en el mismo plano; esta imagen, siempre invertida (*fig.* 235), tiene exactamente la misma dimensión que el objeto.

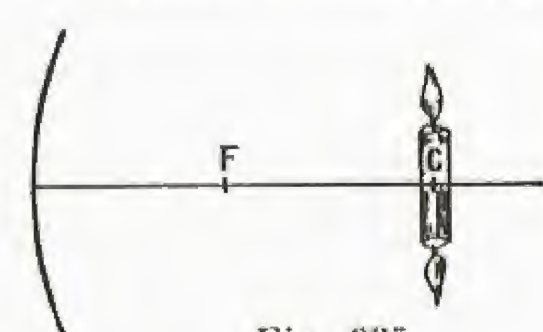


Fig. 235

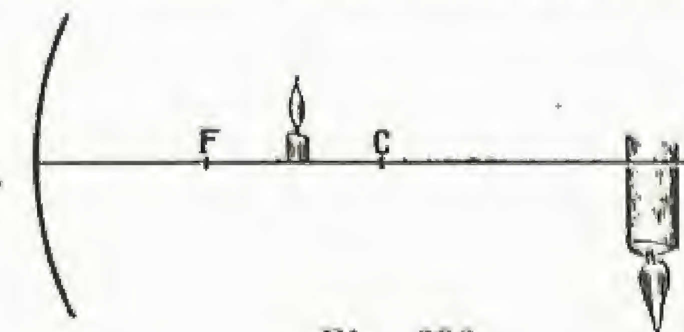


Fig. 236

4° Si continúa aproximándose el objeto, la imagen sigue alejándose cada vez más rápidamente, llegando a ser, siempre invertida, mayor que el objeto.

5° Cuando el objeto se encuentra en el plano focal, la imagen se encuentra en el infinito, su dimensión es enorme y, por consiguiente, es muy poco luminosa. Encontramos en los párrafos 4° y 5° resultados conformes con el principio del retorno inverso de la luz relativo a la intercambiabilidad de la imagen y el objeto (*fig.* 236).

6° Cuando el objeto sobrepasa el plano focal, aproximándose al espejo, no es posible recoger la imagen en una pantalla; la imagen, que hasta ese momento era real, se hace virtual. Si nos colocamos de forma que recibamos en el ojo una parte de los rayos reflejados, observaremos una imagen todavía mayor que el objeto, pero del mismo sentido, es decir, derecha, y que disminuye cuando el objeto se aproxima al espejo (*fig.* 237).

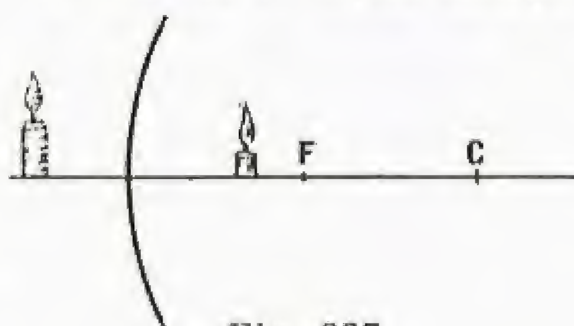
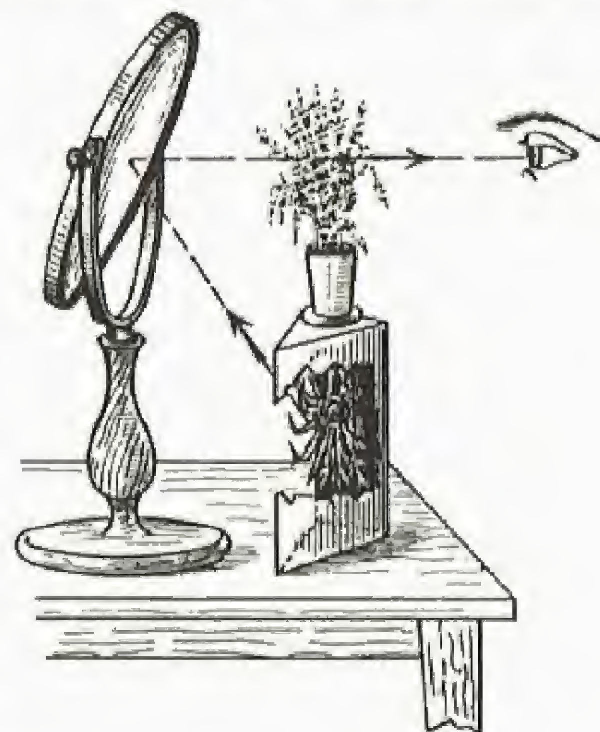


Fig. 237


El ramillete mágico
(El espejo da una imagen real y derecha del ramo invertido, y la maceta vacía parece una maceta de flores)

El espejo cóncavo puede dar, pues, imágenes reales y virtuales. Las imágenes y el objeto se desplazan siempre en sentido inverso.

Es posible, valiéndose de los resultados de las experiencias precedentes, trazar una curva que permita encontrar la posición de la imagen, conocida la del objeto, o inversamente. Tomemos dos ejes de coordenadas rectangulares SP y SP' (*fig.* 238). Sobre el eje de abscisas SP se llevan las distancias p del objeto al vértice del espejo, y sobre el eje de ordenadas SP' las distancias correspondientes p' de la imagen del espejo. La curva que une los puntos representativos obtenidos pasa por el punto de coordenadas $p = R$ y $p' = R$; la curva es una hipérbola equilátera, cuyas asíntotas son paralelas a los ejes de coordenadas, a la distancia $\frac{R}{2}$.

Fig. 238

Se denomina *distancia* o *longitud focal* f la mitad del radio de curvatura R del espejo.

También se puede representar por una curva el aumento lineal, es decir, la relación entre las dimensiones de la imagen y el objeto para las diversas distancias p del objeto al espejo. Para ello basta con medir la imagen en la pantalla. Esta relación será negativa cuando la imagen sea invertida, como sucede cuando p varía entre f y el infinito, representado por el signo ∞; de esta forma se obtiene una rama de otra hipérbola.

Teoría de los espejos cóncavos. — Aplicando las leyes de la reflexión a los espejos esféricos cóncavos es posible obtener la dirección de los rayos reflejados, debiendo llegarse de nuevo, mediante razonamiento, a los resultados de las experiencias anteriores; la teoría permitirá establecer, además, fórmulas matemáticas y construcciones gráficas que fijen la posición, la dimensión y el sentido de la imagen.

Fig. 239

Sea M un espejo esférico (*fig.* 239) de centro C y vértice S, y consideremos un rayo incidente AI procedente del objeto A, situado cerca del eje óptico, y que encuentra el espejo en I. Para determinar el ángulo de incidencia se traza la normal a la superficie en el punto I; como en una esfera los radios son perpendiculares a los planos tangentes, estos radios son, por consiguiente, las normales buscadas. El rayo reflejado IR tendrá, pues, que: 1°, estar en el plano AIC, que tomaremos como plano de la figura, y 2°, formar con IC un ángulo $\widehat{RIC}$ igual al $\widehat{AIC}$. Para encontrar más fácilmente la dirección del rayo reflejado, se traza por el centro C un radio CS' paralelo al rayo luminoso incidente AI (CS' es un eje óptico secundario). El rayo reflejado IR corta CS' en F', que está situado casi exactamente en el punto medio de CS'. En efecto, los ángulos $\widehat{AIC}$ y $\widehat{ICS'}$ son iguales por alternos internos, y el triángulo ICF' es isósceles, siendo F'C = IF'. Si se traza desde F' la perpendicular F'H a IC se tendrá: $IH = HC = \frac{R}{2}$, siendo R el radio de la esfera; en el triángulo IF'C,, F'C difiere muy poco de C, y,

por lo tanto, de $\frac{R}{2}$, y F′ está muy cerca del punto medio de S′C. En el triángulo HCF′, HC = F′C cos $\widehat{ICF'}$, por lo que, si $\widehat{i}$ es el ángulo de incidencia:

$$HC = \frac{R}{2} = F'C \cos \widehat{i};$$

$$F'C = \frac{R}{2 \cos \widehat{i}}.$$

En virtud de la hipótesis que hemos formado, la abertura del espejo es pequeña, y el ángulo $\widehat{i} = \widehat{ICS'}$ es inferior a la semiabertura angular, y por consiguiente menor de 10°; es decir, cos $\widehat{i}$ está comprendido entre cos 0° y cos 10°, o sea entre 1 y 0,985.

F′C, que es igual a $\frac{R}{2}$ cuando $\widehat{i}$ es muy pequeño y próximo de 0°, aumenta ligeramente hasta $\frac{R}{2}$. 1,015 cuando $\widehat{i}$ vale 10°, que es ya un ángulo notable.

Reflexión de rayos paralelos. — Si consideramos ahora un haz de rayos paralelos AI, les corresponderán ángulos de incidencia que varían entre 0 y algunos grados, y el cálculo precedente nos muestra que los rayos reflejados pasarán todos por el punto F′, o por su proximidad muy inmediata. Toda luz reflejada se concentrará, pues, en F′, que por esta razón se denomina *foco*.

Cuando los rayos luminosos incidentes son todos paralelos al eje óptico principal, los rayos reflejados pasan todos por el punto F —o muy cerca de él— situado en el eje, a la mitad de la distancia entre el centro y el vértice: F es el foco principal.

El conjunto de los focos constituye, pues, una pequeña porción de esfera de centro C y de radio igual a $\frac{R}{2}$, es decir, a f, distancia focal. Esta pequeña porción de esfera puede asimilarse a un plano; es el plano focal en el que se forman las imágenes de los puntos infinitamente alejados que envían al espejo rayos sensiblemente paralelos.

Imagen de un punto. Fórmula de los espejos. — Existe una fórmula fundamental que establece una relación entre las distancias de un punto y su imagen y la distancia focal.

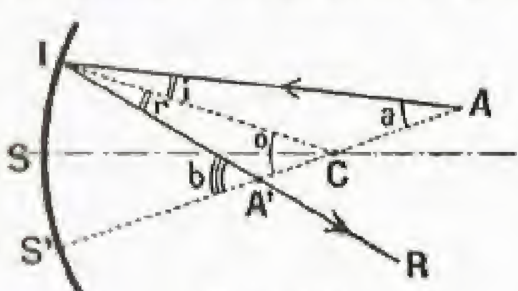


Fig. 240

Consideremos un punto A, próximo al eje óptico de un espejo, al cual envía un haz de rayos luminosos (*fig.* 240). Entre estos rayos, consideremos el que pasa por el centro C del espejo, que es normal a la superficie, y cuyos ángulos de incidencia y de reflexión son nulos: se refleja, pues, volviendo sobre sí mismo.

Si existe la imagen A′ del punto A, debe encontrarse sobre el eje secundario ACS′, y basta mostrar que un rayo reflejado cualquiera IR corta este eje en un punto A′ fijo. Sea la figura 240: el ángulo $\widehat{ICS'} = \widehat{o}$, exterior al triángulo AIC es igual a la suma de los dos ángulos interiores no adyacentes:

$$\widehat{o} = \widehat{i} + \widehat{a} \quad \text{o} \quad \widehat{i} = \widehat{o} - \widehat{a}.$$

Análogamente, en el triángulo ICA′:

$$\widehat{b} = \widehat{r} + \widehat{o} \quad \text{o} \quad \widehat{r} = \widehat{b} - \widehat{o}$$

pero $\widehat{i} = \widehat{r}$ y, por consiguiente, $\widehat{o} - \widehat{a} = \widehat{b} - \widehat{o}$, o también $\widehat{a} + \widehat{b} = 2\widehat{o}$.

Como todos estos ángulos son pequeños —inferiores, por ejemplo, a 10°—, los arcos de los círculos que puedan trazarse desde A y A′ como centros, con radios respectivos AS′ y A′S, se confunden muy sensiblemente con el arco S′I.

Sea, ahora, CI = CS = R, S′A = p, S′A′ = p'; se tendrá

$$S'I = \widehat{o} \cdot R = \widehat{a} \cdot p = \widehat{b} \cdot p',$$

$$\widehat{a} = \widehat{o}\frac{R}{p} \quad \text{y} \quad \widehat{b} = \widehat{o} \cdot \frac{R}{p'};$$

pero $\widehat{a} + \widehat{b} = 2\widehat{o}$, y por consiguiente,

$$\widehat{o} \cdot \frac{R}{p} + \widehat{o} \cdot \frac{R}{p'} = 2\widehat{o}.$$

Dividiendo por el producto $\widehat{o}$. R, se obtendrá, finalmente, la ecuación

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{R}$$

o, como el radio R vale dos veces la distancia focal f:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f};$$

fórmula llamada de los espejos, que permite calcular $p' =$ S′A′:

$$\frac{1}{p'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p} = \frac{p-f}{pf}$$

o

$$p' = \frac{pf}{p-f} = \frac{f}{1 - \frac{f}{p}},$$

que muestra que la posición del punto A′ no depende del punto de incidencia I (siempre con la restricción relativa a los ángulos de abertura $\widehat{o}$ y de incidencia $\widehat{i}$). Todos los rayos procedentes de A pasarán, después de reflejados, por el punto A′, imagen de A. Hemos encontrado, además, la fórmula que liga las distancias p y p' del objeto y de su imagen en el espejo.

Si se da a p diferentes valores, pueden calcularse los valores p' correspondientes. Los resultados de nuestras experiencias pueden comprobarse con gran exactitud, en particular:

1° Cuando p es infinitamente grande ($p = \infty$), la fracción $\frac{f}{p}$ es infinitamente pequeña, es decir, nula, y $p' = \frac{f}{1 - \frac{f}{p}} = f$;

2° Cuando p está comprendido entre $-2f$ y el infinito, los valores de p' están comprendidos entre $2f$ y f;

3° Si $p = 2f$: $p' = 2f$, y el objeto y la imagen están a la misma distancia del espejo;

4° Si p se hace inferior a $2f$, permaneciendo mayor que f, se observará que p' permanece superior a $2f$;

5° Cuando p es exactamente igual a f, p' es infinito;

6° Finalmente, si p es menor que f, p' es negativo. Es decir, la imagen es virtual y se forma detrás del espejo.

En resumen, la curva de variación p' en función de p, construida según la fórmula $p' = \frac{pf}{p-f}$, coincide exactamente con la obtenida experimentalmente.

Construcción gráfica de la imagen de un objeto. — Sea un objeto AB, perpendicular al eje óptico de un espejo cóncavo M. Muestra la experiencia que la imagen es también perpendicular a este mismo eje, y bastará, pues, determinar la imagen de un punto del objeto A (*fig.* 241). Este punto A envía al espejo un haz luminoso, entre cuyos rayos hay tres que son especialmente interesantes: el primero es el que pasa por el centro C de la esfera, y se refleja sobre sí mismo, por ser normal a la superficie; el segundo es el paralelo al eje óptico del espejo, que al reflejarse pasa por el foco principal F, situado en el punto medio de SC; el tercero es el que pasa por el foco F y, por consiguiente, se refleja paralelamente al eje óptico.

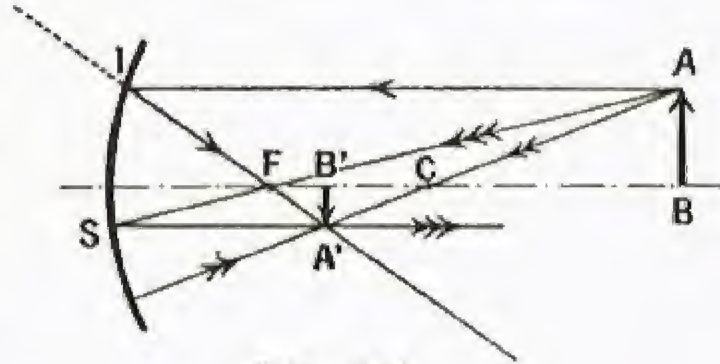


Fig. 241

Los tres rayos reflejados se cortan en el punto A′, imagen del punto A; la imagen del objeto AB es A′B′. Por otra parte, para encontrar el punto A′, basta con considerar solamente dos cualesquiera de los tres rayos indicados.

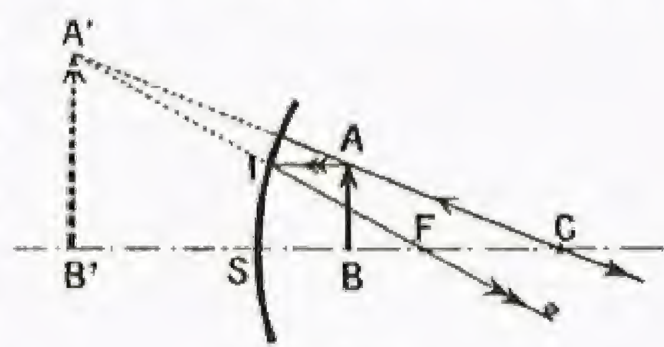


Fig. 242

Puede observarse que el rayo paralelo al eje y el rayo que refleja son completamente independientes de la distancia del objeto al espejo; cuando esta distancia varía, la imagen del punto A se desplaza a lo largo de la recta IF, y volvemos a encontrar gráficamente los seis casos estudiados anteriormente. La figura 242 corresponde al caso en que el objeto está situado entre el espejo y el plano focal: la imagen es virtual y derecha.

Imagen de un objeto en el infinito. — Orientemos un espejo cóncavo hacia el sol: sobre una pequeña pantalla se obtendrá, en el plano focal, una pequeña imagen redonda tan brillante, que al cabo de muy breve tiempo la pantalla puede llegar a inflamarse. ¿Cómo podrá calcularse el diámetro de la imagen?

Los rayos luminosos procedentes del borde superior del sol son paralelos, y al reflejarse pasan por el foco F′ situado en el eje secundario que pasa por el centro C, y que está dirigido hacia el mismo borde del sol (*fig.* 243). Análogamente, los rayos procedentes del borde inferior pasan, al reflejarse, por el foco F″ situado sobre el eje secundario, dirigido esta vez hacia el borde inferior del sol. El diámetro de la imagen es, pues F′F″. Pero el ángulo $\widehat{F'CF''}$ es igual al ángulo bajo el cual vemos nosotros mismos el sol, es decir, es su diámetro aparente $\widehat{a}$, que vale, en promedio, 32 minutos de ángulo, o sea 0,0093 radianes. F′F″ puede asimilarse a un pequeño arco de círculo de centro C y de radio CF′ = CF″ = f; por consiguiente, F′F″ = f . $\widehat{a}$ = = 0,0093 f.

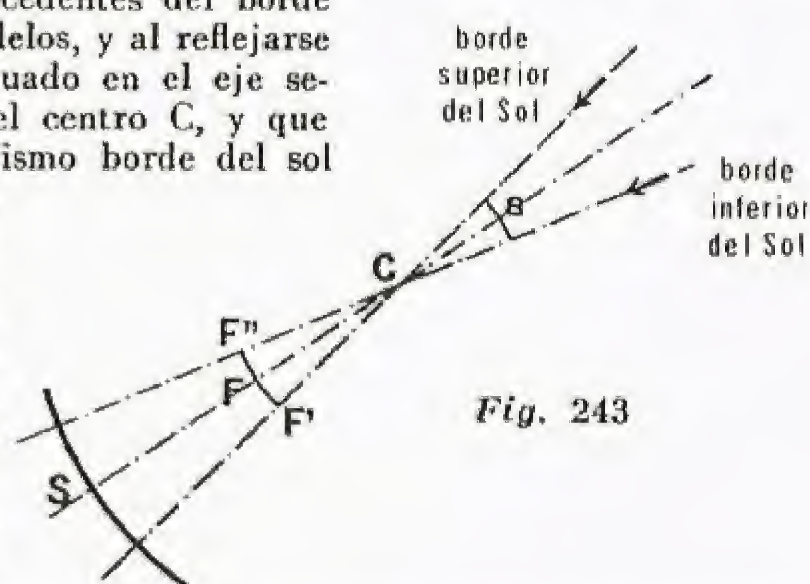


Fig. 243

Inversamente, si se mide el diámetro d de la imagen del sol dada por un espejo cóncavo, podrá deducirse la distancia focal f o el rayo de curvatura R = $2f$:

$$f = \frac{d}{0,0093}.$$

Aumento lineal. — Sea A'B' la imagen de un objeto AB dada por un espejo cóncavo M. El rayo incidente AS se refleja según SA', y los ángulos $\widehat{ASC}$ y $\widehat{CSA'}$ son, por consiguiente, iguales, en virtud de la ley de reflexión. De donde resulta que los dos triángulos ABS y A'B'S son semejantes:

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{SB'}{SB};$$

si A'B' = i, y AB = o, el aumento lineal es el cociente $g = \dfrac{i}{o}$.

Si se observa que, al ser la imagen invertida, el cociente $\dfrac{i}{o}$ debe ser negativo, mientras que p y p' son ambos positivos:

$$g = \frac{i}{o} = -\frac{p'}{p},$$

o, teniendo en cuenta la fórmula de los espejos:

$$g = \frac{i}{o} = -\frac{f}{p - f} \quad (fig.\ 244).$$

Fig. 244

El aumento lineal se hace positivo, es decir, la imagen derecha, cuando p' o p es negativo, es decir, cuando la imagen o el objeto son virtuales.

El cuadro siguiente es un resumen de la discusión sobre la posición y la dimensión de la imagen.

p	∞ decrece	$2f$	decrece	f	decrece	0
p'	f crece	$2f$	crece	$+\infty$ | $-\infty$	crece	0
g	0 decrece	-1	decrece	$-\infty$ | $+\infty$	decrece	$+1$

Cuando p es igual a f se produce una verdadera discontinuidad; cuando p es algo superior a f, p' es infinitamente grande y positivo, y la imagen es infinitamente grande, real e invertida. Cuando p es algo inferior a f, p' es infinitamente grande y negativo, y la imagen infinitamente grande, virtual y derecha.

Aplicaciones de los espejos cóncavos. — 1º Si se coloca una lámpara eléctrica en el foco de un espejo cóncavo, se obtiene un haz de rayos paralelos al eje: así se constituye un *proyector*; pero como la propiedad del foco sólo se verifica rigurosamente para espejos de poca abertura, únicamente puede reflejarse una parte bastante pequeña de la luz incidente. Por ello, se prefiere utilizar para los proyectores los espejos parabólicos, que se estudiarán más adelante.

2º El objeto y su imagen en un espejo cóncavo están situados en un mismo plano cuando el objeto está en el centro. Este hecho se aprovecha en ciertas lámparas de incandescencia, cuya ampolla esférica está plateada en un solo hemisferio, ocupando el filamento el centro de la ampolla. Así se obtiene una imagen del filamento, de forma que, en la dirección del eje óptico del reflector, casi se duplica la intensidad de la lámpara.

3º Cuando un objeto está situado entre su foco y el vértice de un espejo cóncavo, la imagen es virtual y aumentada. Estos espejos se utilizan para obtener una imagen aumentada de la cara, colocando la cabeza entre el foco y el espejo (especialmente para afeitarse).

Espejos convexos

Son espejos esféricos que reflejan los rayos por su cara convexa. Se comprueba inmediatamente que es imposible obtener imágenes reales de los objetos que se colocan ante tales espejos; sólo dan imágenes virtuales derechas y más pequeñas que el objeto.

Teoría de los espejos convexos. — Los rayos paralelos se reflejan como si procedieran de un foco situado en el eje secundario paralelo a los rayos incidentes, pero este foco es, en este caso, virtual, y los rayos reflejados divergen. Puede hacerse nuevamente sobre la figura el mismo razonamiento que en el caso de los espejos cóncavos. Un punto A tiene su imagen virtual A' en el eje secundario AC. Se hará de nuevo SB = p, SB' = p', observando que si se escoge como sentido positivo el inverso de la luz incidente (es decir, desde S hacia A), tanto p' como la longitud focal SF son negativos; se obtiene de nuevo la relación

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f} \quad (fig.\ 245).$$

La construcción de la imagen de una recta AB se efectúa por medio de los mismos rayos que en el caso de los espejos cóncavos: 1º, el rayo AC, dirigido hacia el centro, que se refleja sobre sí mismo; 2º, el rayo AI, paralelo al eje, que después de reflejarse parece proceder del foco F; 3º, el rayo AF, dirigido hacia el foco, que no lo alcanza y que es devuelto paralelamente al eje. La imagen A' se encuentra en la intersección de los tres rayos reflejados; A'B' es derecha, menor que el objeto, virtual y está situada entre el foco y el espejo (cualquiera que sea la distancia del objeto AB, la imagen A está situada sobre la recta FI). En virtud del principio del retorno inverso de la luz, un objeto virtual situado en A'B', entre C y F, tendrá esta vez una imagen real. Para constituir un objeto virtual basta, como muestra la figura, utilizar un espejo cóncavo auxiliar que dé del objeto AB una imagen real A'B': se coloca después (*fig.* 246) el espejo cóncavo de manera que intercepte los rayos reflejados, impidiendo la formación de A'B'. En cuanto al aumento lineal $g = \dfrac{i}{o}$, sigue siendo igual a $-\dfrac{p}{p}$, o a $\dfrac{-f}{p-f}$; cuando p varía desde 0 hasta el infinito, sigue siendo positivo e inferior a 1.

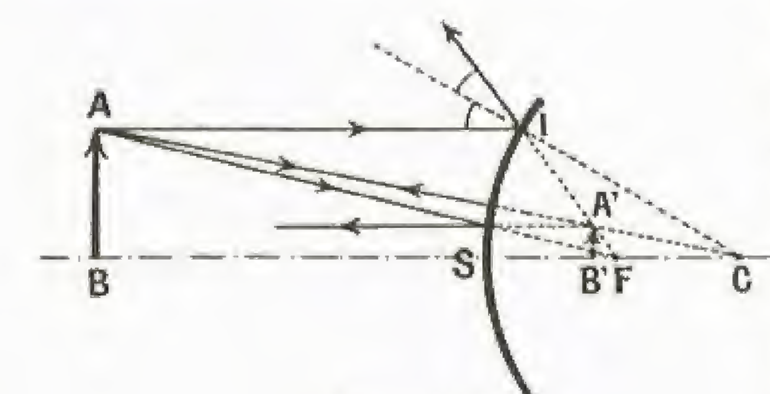


Fig. 245

Aplicaciones de los espejos convexos. — Como el campo de estos espejos es muy amplio y sus imágenes pequeñas y derechas, se utilizan sobre todo como *retrovisores* en los automóviles. Permiten que los conductores observen la parte de la carretera que queda detrás de sus vehículos. También se emplean como espejos de bolsillo, porque dan la imagen completa de la cara con sólo un diámetro de pocos centímetros.

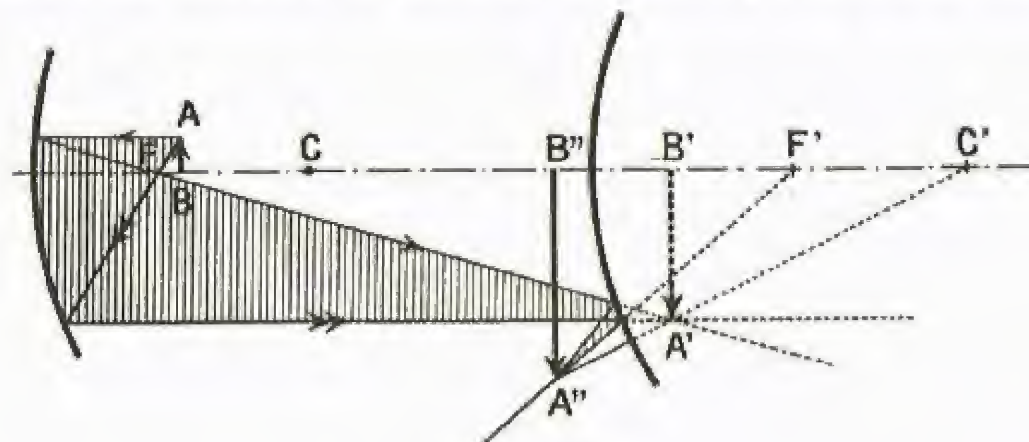


Fig. 246

Se hablará más adelante de la aplicación de los espejos curvos a los diferentes tipos de telescopios.

Espejos parabólicos

Hemos visto que cuando la abertura de un espejo esférico se hace cada vez mayor, los rayos paralelos dirigidos hacia los bordes del espejo (rayos marginales) pasan al reflejarse por puntos que se separan cada vez más del foco (rayos centrales). Esta desviación se denomina *aberración de esfericidad*, y es del

1,5 por ciento	para una abertura de	20º
3,5 por ciento	—	30º
6,4 por ciento	—	40º
12,1 por ciento	—	60º (*fig.* 247).

Esta aberración es la que hace que los espejos cóncavos no puedan utilizarse en los proyectores de ciertos telescopios, por lo que se emplean espejos cuya superficie es un paraboloide de revolución. Estos espejos son los denominados parabólicos, porque su superficie es la engendrada por la rotación alrededor de su eje de la curva denominada parábola.

La propiedad fundamental de esta curva es la siguiente (*fig.* 248). Sobre el eje de simetría de la curva existe un foco, F, tal que un rayo vector FI cualquiera forma con la normal a la curva IN un ángulo igual al que forma una paralela IR al eje con la misma normal. Esta propiedad nos permite asimilar FI a un rayo luminoso incidente, e IR al rayo reflejado, o inversamente. Por consiguiente, no se produce aberración alguna en el foco de estos espejos, a los cuales puede darse una gran abertura. Los proyectores de los automóviles son espejos parabólicos en cuyos focos se colocan pequeñas lámparas eléctricas de filamentos muy cortos, que constituyen fuentes luminosas puntuales. Gracias al excelente rendimiento de estos espejos, de gran abertura, el alcance y la luminosidad de estos faros son considerables.

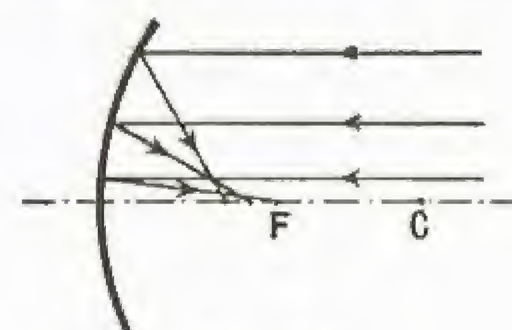


Fig. 247

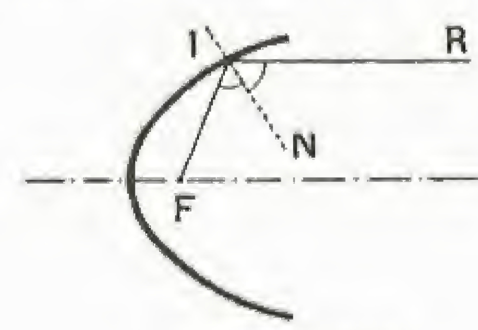


Fig. 248

Medida de la longitud focal de un espejo esférico. — Si se conoce el radio de curvatura R, se tendrá inmediatamente $f = \dfrac{R}{2}$.

En el caso de un espejo cóncavo, bastará:

1º Medir la distancia p de un objeto y la p' de su imagen al espejo, y aplicar después la fórmula

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}.$$

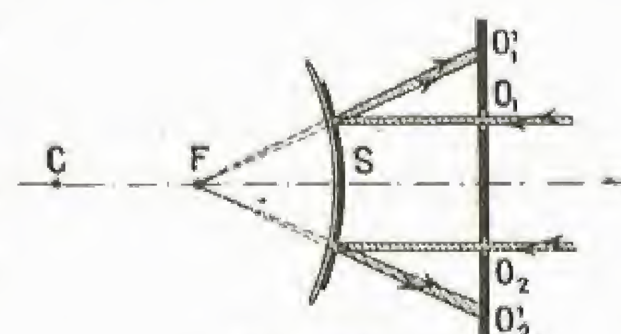


Fig. 249

Es ventajoso tratar de obtener la imagen en el mismo plano que el objeto, porque entonces $p = p' = 2f$;

2º Medir el diámetro de la imagen focal del sol:

$$f = \frac{d}{0{,}0093}.$$

Si el espejo es convexo, pueden utilizarse dos métodos:

Por medio de un espejo cóncavo auxiliar se forma la imagen real de un objeto, y se localiza la posición de esta imagen con una pantalla. Entonces se interpone el espejo cóncavo, y la imagen se convierte en objeto virtual, cuya distancia p (negativa) al espejo convexo se determina; si p es inferior a la longitud focal, podrá obtenerse una nueva imagen real a la distancia p'.

Se aplica también la misma fórmula:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f};$$

3º Sobre el espejo convexo se envían dos haces estrechos de rayos paralelos que pasan por los orificios O_1 y O_2 de una pantalla opaca. Si la distancia de la pantalla al espejo es igual a f, los rayos reflejados forman en la pantalla dos manchas luminosas O'_1 y O'_2 (que no son imágenes), cuya distancia es, como lo muestra la figura, dos veces la distancia O_1O_2.

Refracción de la luz

Leyes de la refracción. Reflexión total: Descripción del fenómeno de refracción. Leyes de la refracción. Verificación experimental de la ley de Descartes. Valor teórico del índice. Retorno inverso de la luz. Reflexión total. Prismas de reflexión total. — **Dioptrio plano:** Visión a través de un dioptrio plano. — **Láminas de caras paralelas.** — **Prisma:** Fórmulas del prisma. Condiciones de emergencia. Prismas de ángulos pequeños. Variación de la desviación. Desviación mínima. Verificaciones experimentales. — **Dispersión de la luz. Espectro. Color de los cuerpos:** Dispersión de la luz blanca por un prisma. Espectro. Color de los cuerpos

Leyes de la refracción. Reflexión total

Descripción del fenómeno de refracción. — Cuando un rayo luminoso que atraviesa un medio transparente como el aire encuentra la superficie de otro medio transparente, el agua por ejemplo, se refleja parcialmente, pero también penetra en el segundo medio, cambiando de direción. El rayo luminoso se rompe al pasar de un medio a otro, y se dice que se refracta, o que sufre una *refracción*.

Las leyes de la refracción son más complicadas que las de la reflexión. Han sido investigadas por numerosos sabios. Ptolomeo de Alejandría estudió en el siglo II la refracción de la luz al pasar del aire al agua, del aire al vidrio y del vidrio al agua. Al-Hazen, sabio árabe que vivió en El Cairo en el siglo XI, publicó también estudios sobre la refracción. Kepler, astrónomo alemán, también la estudió a finales del siglo XVI, sin encontrar su ley exacta.

Descartes fue el primero que publicó las leyes de la refracción en su libro titulado *Dióptrica*, editado en Leyde en 1637. Otro sabio de la misma ciudad, Snell, encontró también las leyes de la refracción en la misma época que Descartes, pero no dio a conocer sus trabajos. En Inglaterra, las leyes de la refracción se denominan leyes de Snell.

Antes de formular estas leyes, es preciso dar algunas definiciones. El rayo luminoso SI, que se propaga hacia la superficie s de separación (1) (*fig.* 250), es el rayo incidente y forma con la normal IN a esta superficie un ángulo $\widehat{i}$ que se denomina también ángulo de incidencia; el rayo IR será el rayo refractado, que forma con la prolongación de la normal IN el ángulo de refracción $\widehat{r}$.

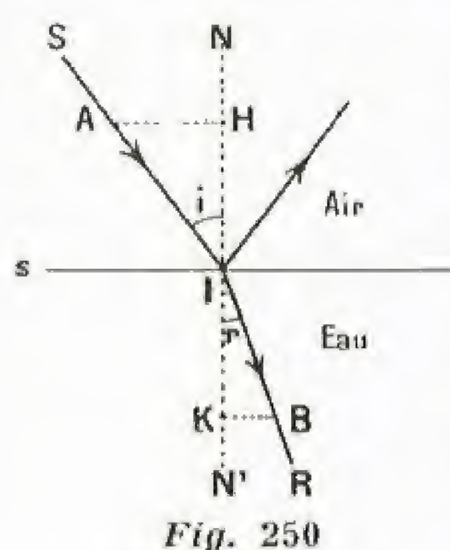


Fig. 250

Llevemos sobre el rayo IS, a partir de I, una longitud cualquiera IA, y tracemos después la perpendicular AH sobre la normal IN. El cociente $\frac{AH}{IA}$ se llama seno del á n g u l o $\widehat{i}$, escribiéndose abreviadamente $\frac{AH}{IA} = \text{sen}\ \widehat{i}$.

Llevemos igualmente sobre el rayo refractado IR una longitud IB, igual a IA, y tracemos la perpendicular BK a la normal IN'; se tendrá también $\frac{BK}{IB} = \text{sen}\ \widehat{r}$.

Leyes de la refracción. — Primera ley. *El rayo incidente* SI, *el rayo refractado* IR *y la normal* NIN' *a la superficie de separación, en el punto de incidencia, están en el mismo y único plano.*

Segunda ley. *El cociente del seno del ángulo de incidencia por el seno del ángulo de refracción es una cantidad constante.*

Esta relación se denomina *índice de refracción* n del segundo medio con respecto al primero. Esta ley se f o r m u l a, por consiguiente,

$$\frac{\text{sen}\ \widehat{i}}{\text{sen}\ \widehat{r}} = n.$$

Cuando un rayo luminoso pasa del aire al agua, $n = \frac{4}{3}$, que es el índice del agua con respecto al aire.

Si el rayo pasa del aire al vidrio, $n = \frac{3}{2}$ aproximadamente, variando este valor con la naturaleza del vidrio.

Para resolver los problemas de refracción hay que conocer los senos de los ángulos, que están tabulados.

Sea $\widehat{r}$ el ángulo de refracción que hay que calcular, correspondiente a un ángulo de incidencia $\widehat{i} = 60°$ en el caso del paso del aire al vidrio.

(1) Si la superficie s es un plano, la normal IN es la perpendicular a este plano, pero si s tiene una forma cualquiera, la normal IN es perpendicular al plano T, tangente a la superficie s en el punto I.

Se tendrá: $\frac{\text{sen}\ 60°}{\text{sen}\ r} = \frac{3}{2}$, sen 60° = 0,867,

de donde se obtiene: $\text{sen}\ \widehat{r} = 0{,}867 \cdot \frac{3}{2} = 0{,}577$ y $\widehat{r} = 35°\ 15'$, valor proporcionado por una tabla de senos.

A continuación se da una tabla de refracción que indica los ángulos de refracción correspondientes a los diferentes ángulos de incidencia en los casos de la refracción del aire en el agua, $n = \frac{4}{3}$, y del aire en el vidrio, $n = \frac{3}{2}$.

ÁNGULOS DE INCIDENCIA	ÁNGULOS DE REFRACCIÓN	
$\widehat{i}$	$n = \frac{4}{3}$	$n = \frac{3}{2}$
0	0	0
15º	11º 12′	9º 56′
30º	22º 1′	19º 28′
45º	32º 2′	28º 7′
60º	40º 30′	35º 15′
75º	46º 26′	40º 5′
90º	48º 35′	41º 48′

Cuando el ángulo de incidencia es de 90º, el rayo es rasante a la superficie de separación de ambos medios, y la incidencia es rasante.

Puede denominarse *desviación* la diferencia $\widehat{i} - \widehat{r}$, que es, en efecto, el ángulo que se desvía el rayo refractado al pasar al segundo medio. Esta desviación aumenta cuando aumenta la incidencia.

Se comprueba, además, que, en la refracción, el rayo se aproxima a la normal cuanto más elevado es el índice de refracción del segundo medio, lo que se expresa diciendo que el segundo medio es más *refringente*.

Verificación experimental de la ley de Descartes. — Se ha visto que $\text{sen}\ \widehat{i}$ (*fig.* 251) es igual a $\frac{AH}{IA}$ y que $\text{sen}\ \widehat{r} = \frac{BK}{IB}$; como $\frac{\text{sen}\ \widehat{i}}{\text{sen}\ \widehat{r}} = n$, se tendrá $\frac{AH}{IA} : \frac{BK}{IB} = n$; escogiendo IB igual a IA, esta igualdad se reduce a $\frac{AH}{BK} = n$.

Sobre una hoja de cartón blanco se traza un círculo de centro I y dos diámetros perpendiculares XX′ y NIN′. Se dispone a lo largo de XX′ una placa gruesa de vidrio de caras paralelas y se clava un alfiler en I y otro en el círculo, en el punto A, con lo que se fija la dirección AI del rayo incidente. Se busca por tanteos, mirando a través de la lámina de vidrio, el lugar donde hay que colocar, apoyándolo contra la segunda cara de la lámina, un tercer alfiler para que parezca exactamente alineado con los otros dos. Sea C este punto; tracemos IC, que al prolongarse, cortará el círculo en B; IB es el rayo refractado en el vidrio.

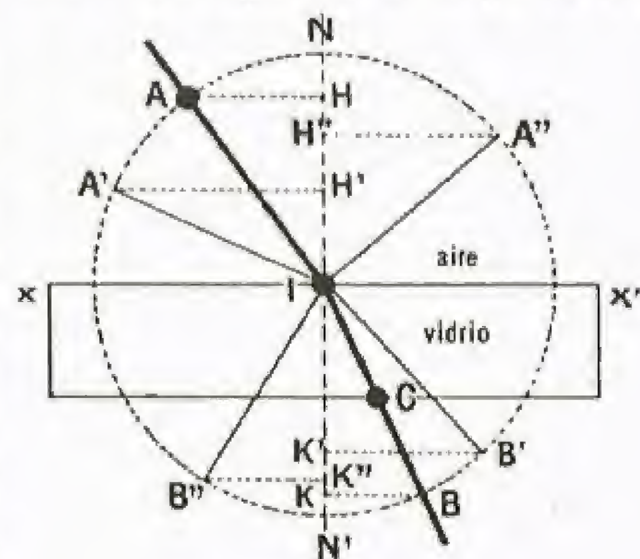


Fig. 251

Se trazan después las perpendiculares AH y BK a la normal NIN′. Esta construcción se hace de nuevo para otros puntos A′, A″, A‴, obteniéndose los puntos B′, B″ B‴.

Entonces se verificará que

$$\frac{AH}{BK} = \frac{A'H'}{B'K'} = \frac{A''H''}{B''K''} = \frac{A'''H'''}{B'''K'''} = n.$$

Valor teórico del índice. — La luz se propaga con diferente velocidad en los diferentes medios, mostrando la teoría que el índice de

refracción n del agua con respecto al aire es igual al cociente entre la velocidad de la luz en el aire y la velocidad de la luz en el agua:

$$n = \frac{V \text{ aire}}{V \text{ agua}},$$

y el índice de un medio con respecto a otro es, en general, igual al cociente de las velocidades de la luz en ambos medios.

Se llama entonces *índice absoluto* de refracción de un medio el índice de este medio con respecto al vacío absoluto o completo (medio privado de toda materia) y en el cual la velocidad de la luz es 300 000 km por segundo. Los índices absolutos difieren muy poco de los índices con respecto al aire. El índice absoluto del aire es, en efecto, muy próximo de 1: exactamente, 1,000292.

El significado del índice permite calcular fácilmente los índices relativos. Ejemplo: sea el índice del vidrio con respecto al agua, cuando la luz pasa del agua al vidrio, el que se quiere calcular.

$$\text{Se tendrá } n = \frac{\text{Velocidad de la luz en el agua}}{\text{Velocidad de la luz en el vidrio}};$$

este cociente será igual al siguiente:

$$n = \frac{\dfrac{\text{Velocidad de la luz en el aire}}{\text{Velocidad de la luz en el vidrio}};}{\dfrac{\text{Velocidad de la luz en el aire}}{\text{Velocidad de la luz en el agua}};}$$

el índice buscado es el cociente entre el índice del vidrio y el índice del agua:

$$n = \frac{n \text{ vidrio}}{n \text{ agua}} = \frac{3}{2} : \frac{4}{3} = \frac{9}{8}.$$

Retorno inverso de la luz. — Consideremos un rayo luminoso procedente de un objeto sumergido en el agua; este rayo, para pasar al aire, se refracta en I, sigue el trayecto OIR (*fig.* 253) y forma los ángulos de incidencia $\widehat{i}$ y de refracción $\widehat{r}$: en este caso se aleja de la normal. El índice del aire con respecto al agua es $\frac{1}{n}$, ya que este índice es el cociente $\frac{\text{velocidad de la luz en el agua}}{\text{velocidad de la luz en el aire}}$, que es el inverso del índice del agua. Los ángulos $\widehat{i}$ y $\widehat{r}$ desempeñan la misma función que los ángulos de refracción y de incidencia en el primer caso estudiado del paso de la luz del aire al agua.

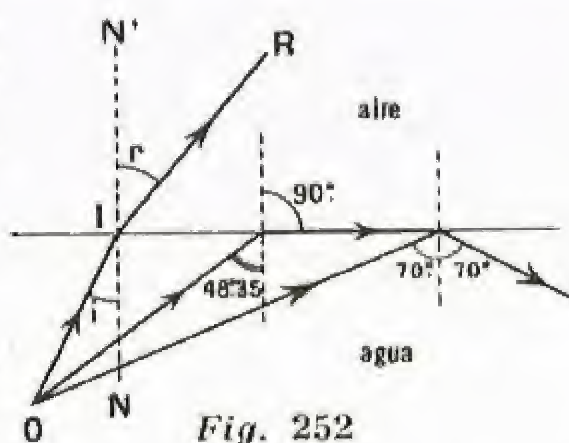
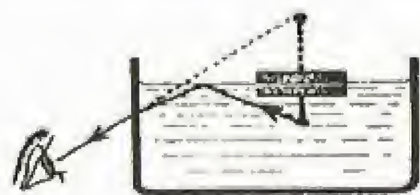


Fig. 252

Reflexión total. — Continuemos el estudio de la refracción de un rayo que, después de propagarse por el agua, pasa al aire. Al crecer la incidencia, el rayo refractado se aleja cada vez más de la normal. Para 46°26', el rayo refractado forma un ángulo de 75° con la normal, y cuando la incidencia alcanza el *valor límite* 48°35', el rayo refractado sale al aire, sino que permanece en el agua, se refleja en su superficie y ángulo de incidencia sobrepase este límite? El rayo ya no puede salir al aire, sino que permanece en el agua, se refleja en su superficie y actúa como un espejo. Como la refracción es imposible, se produce una *reflexión total*. Por consiguiente, para todos los rayos cuyos ángulos de incidencia exceden del ángulo límite (desde 48°35' hasta 90°), se produce reflexión total. Para el vidrio, el ángulo límite es menor, 41°48'.

Este fenómeno de reflexión total puede comprobarse fácilmente haciendo que flote en el agua de una cuba de vidrio bastante grande un tapón, en el que se ha insertado un alfiler sumergido en el agua. Colocando el ojo un poco debajo de la superficie del agua, se observará el alfiler en el aire, sobre la otra cara del tapón. La figura 253 muestra el trayecto de los rayos luminosos que producen este fenómeno.


Fig. 253

Prismas de reflexión total. — Se construyen prismas de vidrio cuya sección recta es un triángulo rectángulo isósceles (*fig.* 254). El rayo luminoso que penetre en el prisma normalmente a la cara AB llegará a la cara hipotenusa BC, formando un ángulo de incidencia de 45°, mayor por consiguiente que el ángulo

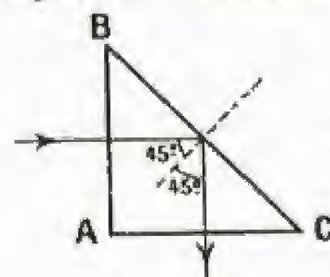
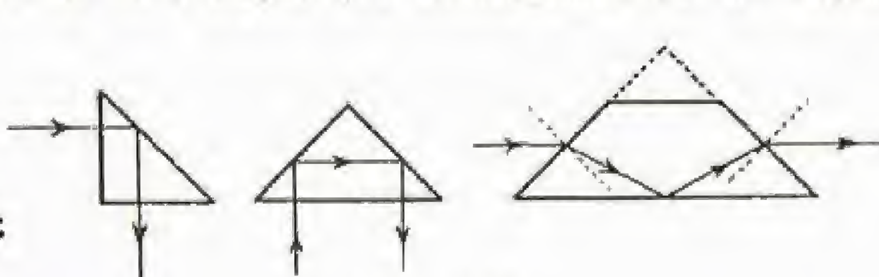


Fig. 254


Fig. 255

límite de 41°48'; entonces se produce la reflexión total y el rayo saldrá del prisma perpendicularmente a la cara AC. La cara BC del prisma actúa exactamente como un espejo plano. La reflexión total se produce también para los rayos incidentes próximos a la normal.

El mismo prisma puede utilizarse de tres maneras diferentes, como muestra la figura 255.

Dioptrio plano

Definición. *Se denomina* **dioptrio** *un sistema óptico formado por dos medios transparentes.* Cuando la superficie de separación de estos dos medios es plana, se dice que el dioptrio es **plano.**

Visión a través de un dioptrio plano. — En un gran recipiente cilíndrico de vidrio se sumerge una regla perfectamente recta (*figura* 256). La regla parecerá que se quiebra en el punto en que penetra en el líquido, y la parte sumergida parecerá más elevada. Esta experiencia, ya conocida antiguamente bajo el nombre de experiencia del bastón quebrado, se explica fácilmente por medio de la refracción. Un rayo luminoso que parte del extremo A de la regla y que penetra en el ojo O del observador sigue el trayecto AIO; al salir del agua se aparta de la normal IN. El observador ve, pues, el punto A como si estuviera en la dirección OI en A'. Análogamente, un punto A_1 se ve sobre la prolongación de OI_1 en A'_1; la parte sumergida MA parece estar más elevada, según MA'_1A'.

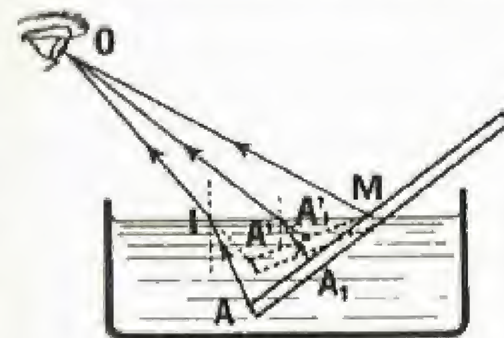


Fig. 256

Si se coloca en el fondo del recipiente una moneda M (*figura* 257), la veremos como si estuviera situada en M', más cerca de la superficie. Puede calcularse la distancia aparente a la superficie de lo que denominaremos imagen de la moneda dada por el dioptrio, cuando los rayos luminosos están poco inclinados sobre la normal a la superficie (*fig.* 258). Los ángulos HMI y HM'I son iguales, respectivamente, a $\widehat{r}$ e $\widehat{i}$, y se tendrá

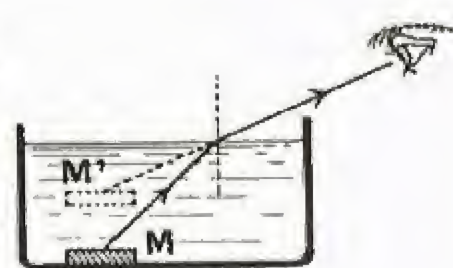


Fig. 257

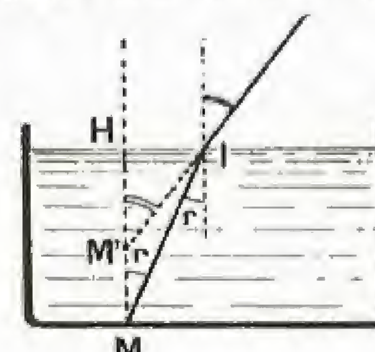


Fig. 258

$$\text{sen } \widehat{r} = \text{sen } \widehat{HMI} = \frac{IH}{IM},$$

$$\text{sen } \widehat{i} = \text{sen } \widehat{HM'I} = \frac{IH}{IM'}; \text{ pero como}$$

$$\frac{\text{sen } \widehat{i}}{\text{sen } r} = n \quad \frac{IH}{IM'} : \frac{IH}{IM} = n,$$

o sea

$$\frac{IM}{IM'} = n.$$

Cuando los rayos están poco inclinados sobre la normal MH, el punto I estará muy cerca de H y podrá escribirse que HM difiere poco de IM, y que HM' es sensiblemente igual a IM, de forma que el cociente $\frac{HM}{HM'}$ será también igual a n; entonces

$$HM' = \frac{HM}{n},$$

que es la relación buscada.

Supongamos, por ejemplo, que el punto M está en el fondo de un estanque de dos metros de profundidad; un observador situado en el borde verá el punto M como si estuviera en M' a una distancia de la superficie igual a 2 m : $\frac{4}{3}$, puesto que el índice del agua es $\frac{4}{3}$, lo que hace, 1,50 m. Es decir, que el estanque nos parecerá disminuido en un cuarto de su profundidad, lo que puede tener consecuencias graves.

Un objeto sumergido en el agua nos parece no solamente situado más alto que lo que está en realidad, sino además acortado en el sentido de la altura, acortamiento que es también la cuarta parte de su verdadera altura.

Láminas de caras paralelas

Sea una lámina de vidrio gruesa, cuyas dos caras extremas AB, A'B' son planas y perfectamente paralelas (*fig.* 259). Un rayo luminoso como SI penetra en el vidrio aproximándose a la normal, según II'; alcanza la segunda cara en I', formando con la normal un ángulo que es igual al ángulo de refracción r, por alternos internos. Saldrá al aire según I'S', formando con la normal un ángulo igual al ángulo $\widehat{i}$ (en virtud del principio de retorno inverso de la luz). Resultará entonces que el rayo I'S' es paralelo al rayo incidente y sólo ha sufrido un desplazamiento lateral IH tanto mayor cuanto más considerable es la incidencia. Un rayo rasante se refracta según el ángulo límite, próximo a 41° para el vidrio, y emerge rasante a la segunda cara de la lámina, siendo el desplazamiento lateral justamente igual al espesor.

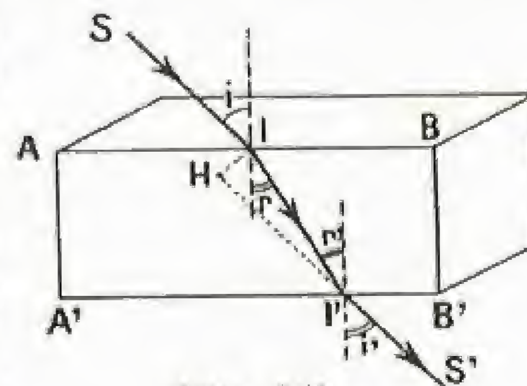


Fig. 259

Examinemos un objeto O a través de una lámina de vidrio de espesor e; los rayos luminosos que recibe el observador parecen proceder de un punto O', más cerca de él (*fig.* 260). Si los rayos están poco inclinados con respecto a la normal, es decir, si la incidencia no rebasa unos cuantos grados, esta aproximación es fácil de calcular aplicando dos veces el resultado hallado precedentemente, primero para el dioptrio AB, y después para el dioptrio A'B'. Se encuentra entonces que la aproximación OO' es igual a

$$e\,\frac{n-1}{n},$$

en donde n el índice del medio formado por la lámina.

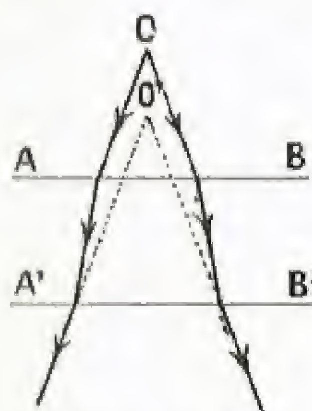


Fig. 260

Inversamente, si una lámina de caras paralelas es atravesada por rayos luminosos que convergen en un punto O', saldrán de la lámina convergiendo en el punto O, que estará alejado en este caso la misma cantidad $e\,\dfrac{n-1}{n}$, o sea $e\,\dfrac{\frac{3}{2}-1}{\frac{3}{2}} = \dfrac{1}{3}\,e$ para el vidrio.

Prisma

Se denomina así un prisma recto, de base triangular, tallado en una materia transparente. El ángulo del diedro formado por dos caras planas se llama ángulo del prisma y una sección del prisma paralela a la base o perpendicular a la arista se denomina sección principal. Estudiaremos la refracción de la luz que atraviesa una sección principal de un prisma.

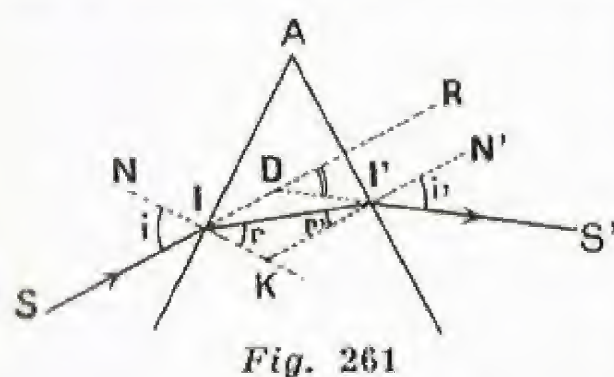


Fig. 261

Un rayo incidente como el SI (*fig.* 261) es refractado, formando con la normal IN a la primera cara un ángulo $\widehat{r}$; alcanza la segunda cara en I', formando con la normal I'N' un ángulo $\widehat{r'}$. Si este ángulo es menor que el ángulo límite, el rayo saldrá del prisma según I'S'; si, al contrario, el ángulo $\widehat{r'}$ excede el ángulo límite, habrá reflexión total, y el rayo no saldrá del prisma.

Fórmulas del prisma. — En los puntos I e I' se producen dos refracciones, regidas por la ley de Descartes; si n es el índice del prisma:

(1) $\quad \operatorname{sen}\widehat{i} = n \operatorname{sen}\widehat{r};$

(2) $\quad \operatorname{sen}\widehat{i'} = n \operatorname{sen}\widehat{r'}.$

Los ángulos $\widehat{r}$ y $\widehat{r'}$ no son independientes; en el triángulo II'K, la suma de los dos ángulos $\widehat{r}$ y $\widehat{r'}$ es igual al suplemento del ángulo IKI'; ahora bien, el cuadrilátero AIKI' es inscriptible ($\widehat{I}$ y $\widehat{I'}$ son rectos), y los ángulos opuestos $\widehat{IAI'}$ y $\widehat{IKI'}$ son suplementarios; la suma $\widehat{r} + \widehat{r'}$ será, pues, igual al ángulo $\widehat{A}$ del prisma. Esto constituye la tercera fórmula.

(3) $\quad \widehat{r} + \widehat{r'} = \widehat{A}.$

El rayo emergente I'S' es desviado hacia la base del prisma. Se llama desviación $\widehat{D}$ al ángulo $\widehat{RDS'}$ que forma la prolongación IR del rayo incidente con el rayo emergente I'S'. Esta desviación es fácil de calcular: en el triángulo IDI', el ángulo exterior $\widehat{D}$ es igual a la suma de los ángulos interiores no adyacentes $\widehat{DII'}$ y $\widehat{DI'I}$, que son respectivamente iguales a $\widehat{i} - \widehat{r}$ y a $\widehat{i'} - \widehat{r'}$. Se tendrá, pues,

$$\widehat{D} = (\widehat{i} - \widehat{r}) + (\widehat{i'} - \widehat{r'}),$$

que puede escribirse

$$\widehat{D} = \widehat{i} + \widehat{i'} - (\widehat{r} + \widehat{r'}),$$

o, teniendo en cuenta la relación (3).

(4) $\quad \widehat{D} = \widehat{i} + \widehat{i'} - \widehat{A}.$

Las cuatro ecuaciones anteriores son las fórmulas del prisma.

Condiciones de emergencia. — Para que el rayo refractado II' pueda salir al aire es necesario que el ángulo $\widehat{r'}$ sea menor que el ángulo límite $\widehat{l}$; por otra parte, el ángulo $\widehat{r}$ es menor que este ángulo límite $\widehat{l}$ y, por consiguiente, $\widehat{r} + \widehat{r'} < 2l$, es decir, que el ángulo $\widehat{A}$ del prisma debe ser también inferior a dos veces el ángulo límite, o sea aproximadamente 82°, en el caso del vidrio.

La figura 262 indica en este caso cómo emergen del prisma rayos incidentes diferentes.

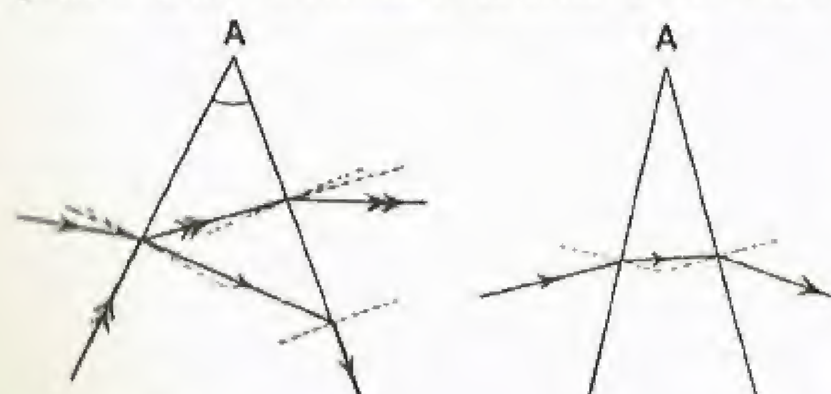


Fig 262 *Fig.* 263

Prismas de ángulos pequeños. — Las fórmulas del prisma se simplifican cuando el ángulo del prisma es sólo de algunos grados y la incidencia es pequeña (*fig.* 263). La fórmula $\operatorname{sen}\widehat{i} = n \operatorname{sen}\widehat{r}$ puede escribirse $\widehat{i} = n\widehat{r}$, relación indicada por Kepler para las incidencias pequeñas.

El ángulo $\widehat{r'}$, que es la diferencia $\widehat{A} - \widehat{r}$ de dos ángulos pequeños, es también un ángulo pequeño, como el ángulo $\widehat{i'}$: podrá, pues, escribirse $\widehat{i'} = n\widehat{r'}$.

La desviación $\widehat{D} = \widehat{i} + \widehat{i'} - \widehat{A} = n\widehat{r} + n\widehat{r'} - \widehat{A} = n(\widehat{r} + \widehat{r'}) - \widehat{A}$;

por consiguiente, (5) $\quad \widehat{D} = n\widehat{A} - \widehat{A} = (n-1)\,\widehat{A}.$

Esta relación, muy importante, muestra que la desviación, pequeña, no depende del ángulo de incidencia cuando este último no tiene más que unos pocos grados.

Variación de la desviación. Desviación mínima. — En el caso general en que los ángulos no son pequeños, la desviación varía con la incidencia. Se indica a continuación un cuadro de los ángulos $\widehat{i}$, $\widehat{r}$, $\widehat{r'}$, $\widehat{i'}$ y $\widehat{D}$, en el caso de un prisma de vidrio de índice $\dfrac{3}{2}$, cuyo ángulo es de 60°:

$\widehat{i}$	$\widehat{r}$	$\widehat{r'}$	$\widehat{i'}$	$\widehat{D}$
90°	41° 48'	18° 12'	27° 56'	57° 56'
75°	40° 5'	19° 55'	30° 44'	45° 44'
60°	35° 16'	24° 44'	38° 52'	38° 52'
48° 36'	30°	30°	48° 36'	37° 12'
45°	28° 7'	31° 52'	52° 25'	37° 25'
30°	19° 28'	40° 32'	77° 4'	47° 4'
27° 56'	18° 12'	41° 48'	90°	57° 56'

Examinando el cuadro, se comprueba que la desviación D es mínima cuando los ángulos $\widehat{i}$ y $\widehat{i'}$ son iguales, lo que supone que el valor de los ángulos $\widehat{r}$ y $\widehat{r'}$ es entonces la mitad del ángulo A del prisma.

Puede representarse por una curva la variación de la desviación en función del ángulo de incidencia $\widehat{i}$. El mínimo es bien visible en la figura 264.

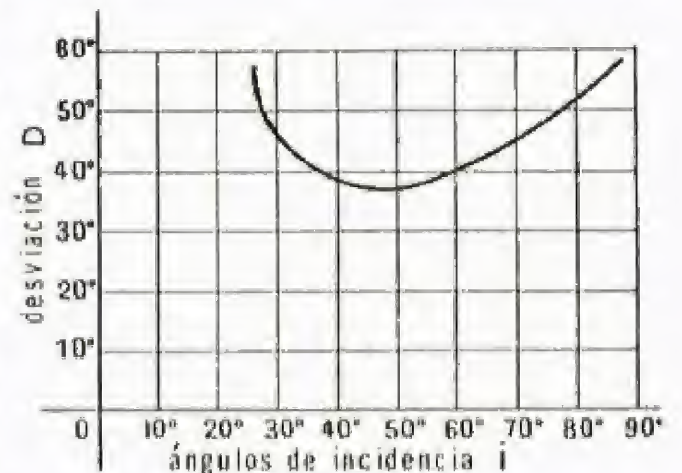


Fig. 264

Verificaciones experimentales. — Los resultados obtenidos precedentemente se verifican sólo con precisión por medio de un instrumento capaz de medir los ángulos con gran exactitud, denominado *goniómetro* (v. pág. 100). La desviación mínima puede aplicarse para calcular el índice de refracción. En efecto, los ángulos $\widehat{i}$ y $\widehat{i'}$ son iguales; el valor de los ángulos $\widehat{r}$ y $\widehat{r'}$ es $\dfrac{\widehat{A}}{2}$, mitad del ángulo del prisma. Sea Dm la desviación mínima:

$$\widehat{Dm} = 2\,\widehat{i} - \widehat{A}, \qquad \text{de donde } i = \frac{A + Dm}{2}$$

$$\text{y } n = \frac{\operatorname{sen} i}{\operatorname{sen} r} = \frac{\operatorname{sen}\dfrac{A + Dm}{2}}{\operatorname{sen}\dfrac{A}{2}}.$$

Tomemos como fuente luminosa una llama de alcohol salado (con sal de cocina) o una llama de gas coloreado de amarillo por un trozo de sal mantenido en un alambre de hierro. Dos rendijas de unos cuantos milímetros de anchura practicadas en dos cartones y dispuestas en los extremos de una regla (*fig.* 265), servirán para aislar un haz estrecho de rayos. El prisma se mantendrá en una plataforma pequeña que pueda girar alrededor de un eje vertical, estando colocada la arista del prisma cerca de este eje de rotación.

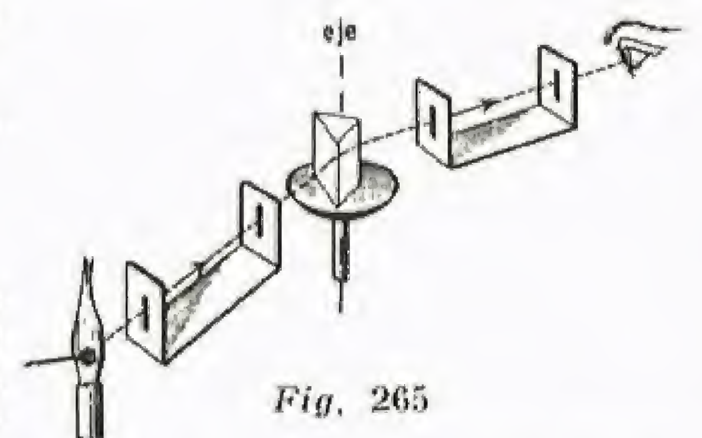


Fig. 265

De esta forma, podrá hacerse que varíe el ángulo de incidencia. Los rayos emergentes se observarán a través de otras dos rendijas practicadas en una regla, que puede también girar alrededor del mismo eje de la plataforma que sostiene el prisma. Si, a partir de la incidencia rasante, se hace girar lentamente el prisma, se comprobará que la desviación disminuye al principio rápidamente, después más lentamente, pasa por un mínimo y aumenta después.

Dispersión de la luz. Espectro. Color de los cuerpos

Dispersión de la luz blanca por un prisma. — En la experiencia descrita al final del capítulo precedente, se utilizó como fuente de luz una llama coloreada de amarillo por una cantidad pequeña de sal de cocina (cloruro de sodio). Si se reemplaza esta fuente por una luz blanca, como la producida por una lámpara eléctrica, por una llama de acetileno o, incluso, por la llama de una bujía, será imposible verificar la fórmula del prisma. En lugar de un rayo emergente único, se encontrará un haz de rayos que divergen; estos rayos tendrán además colores diferentes (*fig.* 266). Si se hace girar la alidada hacia la base del prisma, se encontrará primeramente un rayo rojo, y después, si se

continúa girando muy lentamente, el color de los rayos irá cambiando desde el amarillo al verde, pasando por todos los anaranjados, y después al azul, al añil y al violeta. Para encontrar todos estos rayos emergentes de diferentes colores bastará girar la alidada algunos grados; este nuevo fenómeno se denomina dispersión de la luz. Si no se ha tenido cuidado de canalizar los rayos incidentes a través de las dos rendijas finas que lleva la primera alidada, el haz emergente no tiene el mismo color que el anterior. Será rojo y azul violáceo en los bordes, mientras que en el centro será de color amarillo pálido. La segunda alidada puede reemplazarse por una pantalla de papel blanco colocada a 50 cm del prisma, perpendicularmente a la dirección media de los rayos emergentes.

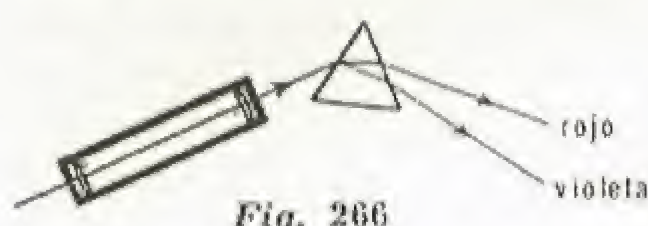


Fig. 266

Este fenómeno es conocido desde hace mucho timpo; siempre se había comprobado que los rayos de luz blanca que se refractan se colorean, irisándose en los bordes con colores completamente análogos a los del arco iris. Se creía que esta coloración no existía en la luz blanca y que se debía únicamente al medio transparente, agua, vidrio, etcétera. Los vidrios que se fabricaban antiguamente estaban siempre ligeramente coloreados de verde pálido o de amarillo suave. Newton fue el primero que estudió detenidamente este fenómeno de la dispersión, y para explicarlo emitió dos hipótesis que en su época parecieron extraordinariamente audaces. Numerosas experiencias han puesto después de manifiesto lo bien fundadas que estaban, y han sido definitivamente admitidas desde hace mucho tiempo.

Espectro. — La dispersión de la luz se explica de la forma siguiente:

1º La luz blanca no es simple, sino que está formada por una infinidad de luces de colores simples, en proporciones determinadas;

2º Las diferentes luces coloreadas simples, que denominaremos *radiaciones monocromáticas*, son refractadas desigualmente por el prisma. Dicho de otra forma, cada radiación se caracteriza, en un medio particular, vidrio, agua, etc., por un índice de refracción. Como la experiencia nos muestra que las radiaciones rojas son menos desviadas que las radiaciones azules o violeta, conviene asignar a los rayos rojos un índice de refracción inferior al de los rayos violeta, siendo la diferencia relativamente pequeña para el vidrio ordinario, 1,52 a 1,53, y un poco mayor para el cristal.

Conviene precisar esta noción de luz coloreada simple. Hagamos de nuevo la experiencia descrita al principio de este capítulo: ajustemos la posición de la alidada de forma que reciba una radiación verde a través de sus dos rendijas finas, y coloquemos detrás de este dispositivo un segundo prisma. Por medio de una pequeña pantalla blanca que se mueve detrás de este segundo prisma se comprobará que el rayo es desviado hacia la base, pero que no se ensancha (dispersa) ni se descompone en rayos más sencillos y de colores diferentes. Por esto se denomina tal rayo "monocromático" (de palabras griegas que significan "un solo color"). Es imposible descomponerlo con nuevas refracciones. La luz amarilla que se obtiene colocando una sal de sodio en una llama que no ilumine es una radiación monocromática; con una sal de litio se obtendría una espléndida luz roja simple, y con una sal de talio una radiación verde igualmente monocromática. Otras sales metálicas dan al mismo tiempo varias radiaciones simples, que también se denominan rayas, porque si colocamos una pantalla detrás del prisma dispersivo se observan rayas bien separadas. Así, una sal de calcio da cierto número de rayas, una de las cuales anaranjada y otra verde. Las llamas no son los únicos medios de obtener radiaciones monocromáticas. Una descarga eléctrica en un tubo que contenga hidrógeno a presión reducida ilumina el gas, que da cuatro radiaciones monocromáticas: una roja, una azul, una añil y la última violeta.

La descomposición, o dispersión, de una luz por un prisma, permite separarla en sus constituyentes simples, que se presentan entonces alineados contiguamente, formando lo que se denomina un *espectro*. El estudio del espectro se hace por medio de un aparato llamado *espectroscopio*, que se compone esencialmente de un prisma alrededor del cual pueden desplazarse tres ramas provistas cada una de un anteojo: la primera recibe la luz que hay que analizar, cuyos rayos se hacen paralelos después de atravesar una rendija, y se dirigen hacia el prisma; a su salida, son recogidos por un segundo anteojo, a través del cual el observador contempla la imagen del espectro; por último, un tercer anteojo está provisto de una escala micrométrica cuya imagen se superpone a la del espectro y sirve de referencia para las rayas y bandas observadas.

Si una luz compleja puede descomponerse en sus radiaciones simples, también se puede, inversamente, superponiendo estas radiaciones, reconstituir la luz primitiva. Puede así comprobarse que la luz solar, que nos parece tan sencilla, está formada por una infinidad de radiaciones monocromáticas. Si las diferentes partes de un espectro solar se recogen mediante varios espejos cóncavos muy pequeños orientados de forma que los rayos reflejados converjan en el mismo punto de una pantalla blanca, se observa en dicho punto una pequeña mancha luminosa blanca. Una segunda experiencia consiste en hacer girar rápidamente un disco dividido en sectores de colores rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, añil y violeta, como en el espectro solar, e iluminarlo violentamente con una luz blanca: el disco parece entonces blanco, o más bien gris claro. A causa de la persistecia de las impresiones luminosas en la retina, las diferentes radiaciones se superponen y dan la impresión del color blanco.

Las radiaciones simples del espectro nos recuerdan los colores naturales o artificiales conocidos; no debe deducirse que estos colores son simples: ello sería un grave error, porque estos colores son muy complejos. Tomemos, por ejemplo, un color amarillo que reproduzca con la mayor exactitud posible la luz amarilla producida por una sal de sodio colocada en una llama no luminosa. El color amarillo examinado a través de nuestro dispositivo prismático nos da radiaciones rojas, anaranjadas, amarillas y verdes; en el espectro total de la luz blanca sólo faltan las radiaciones azules, añiles y violeta. Lo mismo ocurrirá si analizamos la luz verde difundida por las hojas de los árboles, o el rojo de las cerezas: son luces muy complejas. Las comparaciones que se estaría tentado de hacer entre los colores naturales o artificiales y las radiaciones monocromáticas, que pueden denominarse "colores espectrales", carecen, por consiguiente, de valor.

Color de los cuerpos. — ¿Cómo puede explicarse que dos cuerpos iluminados por la misma luz blanca nos parezcan de diferentes colores? Los objetos que reciben una luz compleja absorben más o menos completamente ciertas radiaciones monocromáticas, difundiendo las que no absorben. Así, pues, un cuerpo nos parecerá amarillo a la luz del sol si absorbe el azul y el violeta del espectro; tendrá cierto color rojo si absorbe las radiaciones sencillas verdes y azules; parecerá blanco si difunde todas las radiaciones sin absorberlas, gris neutro si las absorbe todas parcialmente en la misma cantidad, y negro si absorbe por completo todas las radiaciones del espectro.

El color de un objeto depende esencialmente de la naturaleza de la fuente que lo ilumina. Es sabido que los colores cambian cuando la luz artificial, incluso la eléctrica, sucede a la luz natural; ello se debe a que el espectro, es decir, la composición de la luz artificial, tiene una cantidad menor de azul y de violeta. Este efecto es todavía más marcado con la luz verdosa producida por los arcos de mercurio; los colores se modifican completamente, porque esta luz no contiene el rojo, sino solamente cinco radiaciones monocromáticas, dos amarillas muy próximas (que constituyen un doblete), una verde muy intensa, otra añil y otra violeta. Por último, si se iluminan objetos coloreados con una luz rigurosamente simple, como la radiación amarilla del alcohol salado quemado en una pieza completamente cerrada y obscura, desaparece toda impresión de color, y una acuarela parece un dibujo de tinta china. En efecto, todos los colores que absorben totalmente esta única radiación incidente parecen negros y los restantes son de un amarillo más o menos luminoso, según que los cuerpos absorban parcialmente o difundan totalmente la radiación del sodio.

Por último, se denominan *colores complementarios* los colores complejos que, percibidos simultáneamente, vuelven a dar la impresión del color blanco. Dicho de otra forma: si se pintan con colores complementarios las dos mitades de un disco, este disco parecerá blanco cuando se le haga girar. Así, si se suprime el azul y el violeta del espectro, la suma de las radiaciones restantes nos da un cierto amarillo que es el complementario del azul violado. El verde azulado tiene como complementario el rojo anaranjado, etc.

Lentes

Dioptrio esférico: Fórmula del dioptrio. Verificación experimental. — **Lentes esféricas delgadas:** Estudio experimental de las lentes convergentes. Construcción gráfica de la imagen. Dimensión de la imagen. Aumento. Centro óptico de una lente. Fórmulas de las lentes convergentes. Longitud focal de una lente. Lentes divergentes. — **Asociación de lentes:** Convergencia de una lente. Sistema telescópico. — **Focometría.** — **Defectos de las lentes.**

Dioptrio esférico

Definición. El estudio de la refracción de un rayo luminoso a través de una superficie esférica (porción de esfera o casquete esférico) que separa dos medios refringentes diferentes es importante porque permite establecer fácilmente la teoría de las lentes.

Puede construirse un *dioptrio esférico* tallando una superficie esférica en el extremo de una varilla de vidrio cilíndrica. Un medio todavía más simple consiste en pegar en la extremidad de un vidrio de lámpara cilíndrica un vidrio de reloj esférico delgado. El sistema, mantenido verticalmente, se llena de agua (*fig.* 267).



Fig. 267

Fórmula del dioptrio. — Toda recta que pasa por el centro de la esfera es un eje óptico. Consideremos un punto luminoso P (*fig.* 268), que forme con el centro O de la esfera el eje óptico PO. Demostraremos que un rayo luminoso cualquiera como el PI, siempre que forme con el eje óptico un ángulo que no exceda de algunos grados, se refracta según IP′, pasando por un punto fijo P′ del eje óptico. Este punto es, por consiguiente, la imagen del punto objeto P.

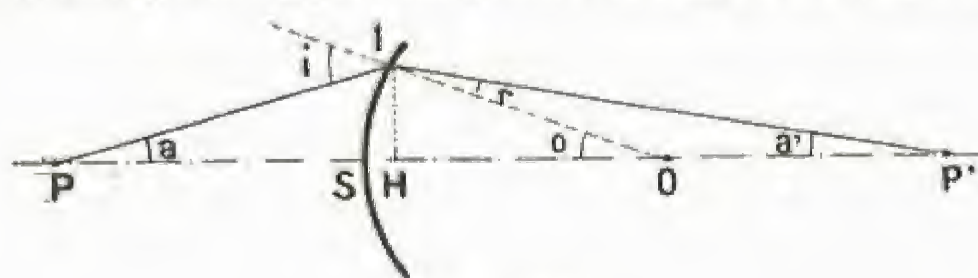


Fig. 268

La normal en el punto de incidencia es el rayo OI; los ángulos de refracción $\widehat{i}$ y $\widehat{r}$ son ambos pequeños, de forma que puede aplicarse en este caso la ley de refracción de Kepler: $i = nr$ (en donde n es el índice del

segundo medio con respecto al primero, que puede suponerse que es el aire). El ángulo $\hat{i}$, por ser exterior al triángulo POI, es igual a la suma de los ángulos interiores no adyacentes: $\hat{i} = \hat{a} + \hat{o}$.

$\hat{r}$, en cambio, es la diferencia entre el ángulo $\hat{o}$ y el ángulo $\hat{a}'$, $\hat{r} = \hat{o} - \hat{a}'$.

Tracemos la perpendicular IH al eje óptico y hagamos SO = R; escojamos como origen de distancias el punto S y como sentido positivo el sentido inverso de la luz: como los puntos S y H están muy próximos, SP puede confundirse con HP, y la distancia SP = p es positiva; análogamente, SP' puede ser igual a HP' = p', que es aquí negativa.

El valor del ángulo $\hat{o}$ es el cociente del arco IS por el radio de la esfera; ahora bien, el arco IS puede confundirse, por su pequeñez, con IH, y por consiguiente

$$\hat{o} = \frac{IH}{R}.$$

Análogamente, el valor del ángulo $\hat{a}$ será $+\frac{IH}{p}$

y $$\hat{a}' = \frac{-IH}{p'} \text{ (puesto que } p' \text{ es negativo).}$$

Se deducen los valores de los ángulos de incidencia y de refracción

$$\hat{i} = \frac{IH}{R} + \frac{IH}{p}, \quad \hat{r} = \frac{IH}{R} - \left(-\frac{IH}{p'}\right),$$

y como $\hat{i} = n\hat{r}$:

$$\frac{IH}{p} + \frac{IH}{R} = n \cdot \frac{IH}{R} + n \cdot \frac{IH'}{p'},$$

o bien, dividiendo por IH y agrupando los términos,

$$\frac{1}{p} - \frac{n}{p'} = \frac{n-1}{R}.$$

La distancia p' no depende, por consiguiente, del ángulo de incidencia. Todos los rayos incidentes que estén poco inclinados sobre el eje pasarán, después de refractados, por el punto P', que es la imagen de P.

Cuando el punto P está infinitamente alejado, p es muy grande y $\frac{1}{p}$ se anula. La fórmula precedente muestra que la imagen P' se fija en un punto del eje que se denomina foco-imagen F'. Este foco se encuentra a una distancia f' de S:

$$\frac{-n}{f'} = \frac{n-1}{R}, \text{ o } f' = -\frac{nR}{n-1},$$

que es la longitud focal-imagen.

La imagen es, al contrario, proyectada al infinito cuando el objeto P se encuentra en un punto F del eje a la distancia f de S, tal como

$$\frac{1}{f} = \frac{n-1}{R}, \text{ o } f = \frac{R}{n-1}.$$

Para este valor de p, se encuentra, en efecto, $-\frac{n}{p'} = 0$; por consiguiente, p' es infinitamente grande.

El punto F es el foco-objeto.

Si se introducen en la fórmula del dioptrio las nuevas magnitudes f y f', se llega fácilmente a las siguientes relaciones:

$$\frac{f'}{f} = -n, \quad f' - f = -R, \quad \frac{f}{p} + \frac{f'}{p'} = 1.$$

Observamos que el rayo del dioptrio se cuenta en este caso positivamente. Al contrario, debería tomarse negativamente si el dioptrio girara su convexidad hacia el segundo medio.

Verificación experimental. — La fórmula del dioptrio puede verificarse experimentalmente utilizando el dispositivo del vidrio de lámpara llena de agua. El objeto será una lámpara eléctrica; se buscará la imagen utilizando un pequeño vidrio esmerilado sumergido en el agua y mantenido en el extremo de una varilla metálica. Se comprobará fácilmente que un pequeño objeto perpendicular al eje óptico tiene una imagen también perpendicular a este eje. Una construcción geométrica sencilla permite obtener la imagen cuando se conoce la posición de los focos F y F' (*fig.* 269).

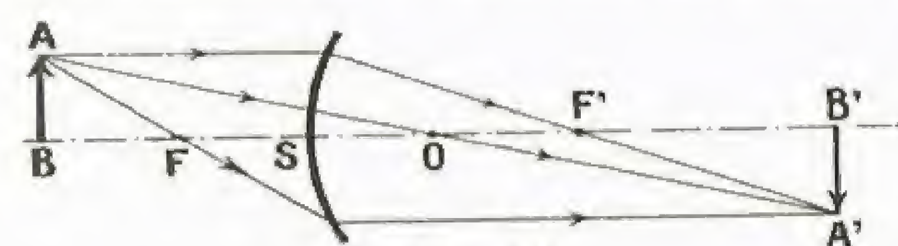


Fig. 269

Un rayo procedente del punto A y paralelo al eje óptico se refracta, como si procediera de un punto infinitamente alejado, pasando por el foco F'. Análogamente, un rayo incidente AF, que pase por el foco-objeto, se refracta paralelamente al eje, porque la imagen de F está infinitamente alejada de S.

Estos dos rayos refractados se cortan en A', imagen del punto A, y la imagen del objeto AB es A'.B'. Puede observarse que el rayo incidente AO, que pasa por el centro de la esfera, se refracta sin desviación y alcanza A'.

Lentes esféricas delgadas

DEFINICIONES. Se denominan lentes los sólidos de materia transparente: vidrio, cristal, cuarzo, sal gema, etc., que constan de dos caras, que son casquetes esféricos, o bien de una cara plana y otra esférica. El borde de las lentes suele ser, por lo general, circular, pero puede también tener otra forma; por ejemplo, los cristales de los antiguos anteojos eran ovalados o elípticos. Se denomina *eje óptico* de una lente la recta que pasa por los centros O y O' de las dos esferas que limitan la cara, o la recta que pasa por el centro de la esfera perpendicular a la cara plana. Este eje atraviesa la lente en dos puntos S y S', denominados *vértices* (*fig.* 270). Pueden ocurrir dos casos: o bien el espesor de la lente en el centro, es decir, la distancia SS' entre los vértices es superior al espesor del borde, en cuyo caso se dice que la lente es *convergente*, o bien, inversamente, el espesor en el centro SS' es menor que en el borde, y entonces la lente es *divergente*. En cada tipo de lente se encuentran tres formas posibles, que tienen nombres particulares y que describiremos a continuación, agrupándolas en un cuadro para mayor claridad (*fig.* 271).

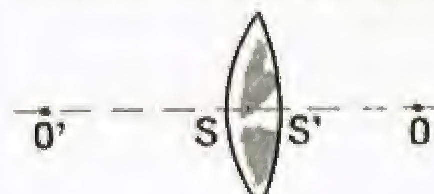


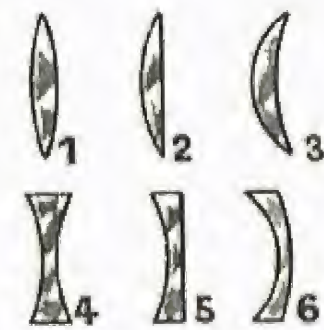
Fig. 270

Lentes convergentes

2 caras esféricas convexas: 1. biconvexa
1 cara esférica convexa, 1 cara plana: 1. planoconvexa
1 cara esférica convexa, 1 cara esférica cóncava: menisco convergente

Lentes divergentes

2 caras esféricas cóncavas: 1. bicóncava
1 cara esférica cóncava, 1 cara plana: 1. planocóncava
1 cara cóncava, 1 cara esférica convexa: menisco divergente



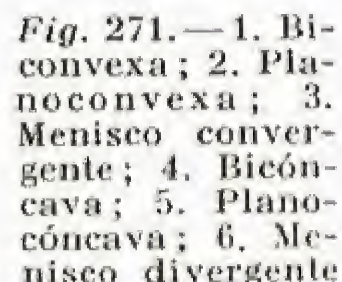


Fig. 271. — 1. Biconvexa; 2. Planoconvexa; 3. Menisco convergente; 4. Bicóncava; 5. Planocóncava; 6. Menisco divergente

Limitaremos nuestro estudio al caso de las lentes muy delgadas, cuyo espesor SS' es muy pequeño, comparado con los rayos R y R' de las esferas que forman las caras. Determinaremos primeramente las propiedades ópticas de estas lentes mediante experiencias, y después emitiremos una teoría que dará fórmulas que permitan volver a comprobar los resultados experimentales.

Estudio experimental de las lentes convergentes. — 1º Dirijamos la lente hacia objetos muy alejados, pero bien iluminados. Sobre una pantalla de papel o de cartón blanco, o sobre un vidrio esmerilado, podrá obtenerse una imagen real invertida y muy pequeña de los objetos. Los rayos luminosos que han atravesado la lente convergen en la pantalla colocada detrás de la misma, a una distancia determinada que se llama, en este caso, *distancia* o *longitud focal* (*figs.* 272 y 273 [1]). El plano en el que está situada la pantalla es el plano focal, que es atravesado por el eje óptico en un punto especialmente importante: el foco principal-imagen (los restantes puntos del plano focal son los focos secundarios).

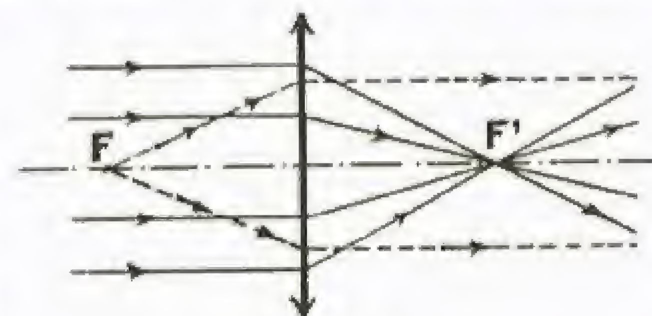


Fig. 272

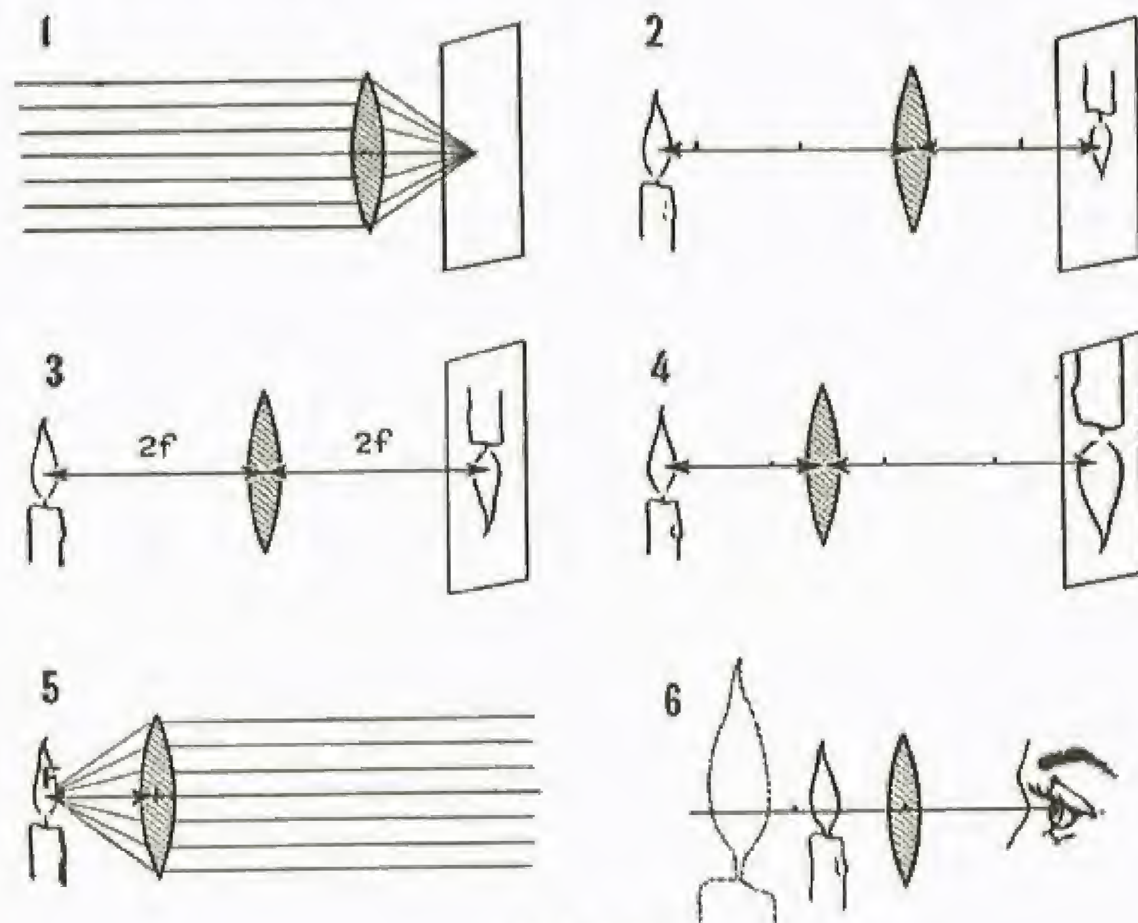


Fig. 273

Si se invierten las caras de la lente (delgada), el plano focal vuelve a encontrarse a la misma distancia.

2º Aproximemos el objeto a la lente. Sea este objeto, por ejemplo, una bujía o una lámpara cualquiera. Se comprueba que es necesario alejar la pantalla para obtener una imagen neta, siempre invertida, pero mayor que la anterior (*fig.* 273 [2]).

3º Cuando el objeto está situado a una distancia de la lente exactamente igual al doble de la longitud focal, hay que colocar la pantalla detrás de la lente, a una distancia también doble de la longitud focal. La imagen, que continúa siendo invertida, tiene entonces la misma dimensión que el objeto (*fig.* 273 [3]).

4º Continuemos aproximando el objeto a la lente; la imagen se aleja cada vez más y continúa aumentando, siempre invertida (*fig.* 273 [4]).

5º Cuando la distancia del objeto a la lente es igual a la longitud focal, ya no puede recogerse su imagen en la pantalla, por estar dema-

siado alejada: se dice que la imagen está en el infinito. Nos encontramos entonces en el caso inverso del primero. El objeto es el que ocupa el plano focal situado delante de la lente (plano focal-objeto) y la imagen está infinitamente alejada. A este plano focal le corresponde un foco principal-objeto (*fig.* 273 [5]).

6º Acerquemos el objeto todavía más, situándolo entre el foco y la lente: no podrá obtenerse imagen alguna sobre la pantalla, cualquiera que sea la posición de esta última. No obstante, si nos colocamos detrás de la lente, divisaremos al mismo lado que el objeto una imagen aumentada y del mismo sentido que el objeto, es decir, una imagen virtual y derecha (*fig.* 273 [6]).

Construcción gráfica de la imagen. — De las experiencias que acaban de describirse podrán deducirse reglas sencillas que permitan construir la imagen dada por una lente convergente. Observaremos primeramente que un objeto situado en un plano perpendicular al eje óptico tiene su imagen situada también en un plano perpendicular a este eje. Consideremos, por otra parte, un punto-objeto infinitamente alejado de la lente y situado en el eje óptico. Este punto-objeto envía a la lente rayos luminosos que son paralelos entre sí, a causa de la distancia, y también paralelos al eje óptico. Como la imagen de dicho punto no puede ser más que el foco principal, resulta que todos los rayos paralelos al eje óptico se refractan a través de la lente convirgiendo hacia el foco principal-imagen F′ (*fig.* 274). Inversamente, si el punto luminoso-objeto ocupa en el eje óptico la posición del foco principal-objeto, los rayos luminosos saldrán de la lente paralelamente a este eje óptico, verificándose el principio del retorno inverso de la luz.

Tenemos, pues, todos los elementos necesarios para construir gráficamente la imagen de un objeto colocado a una distancia dada de una lente convergente de una longitud focal *f*. A causa de la simetría, tomaremos como plano de figura un plano que contenga el eje óptico de la lente. Esta última, que es muy delgada, se representará por una recta perpendicular al eje, en cuyos extremos se dibujan dos flechas que imitan la iniciación de las superficies esféricas (*fig.* 274). Los dos focos son F y F′ situados a la misma distancia de la lente: la longitud focal. Tomemos como objeto la recta AB, normal al eje. Entre todos los rayos trazados desde B, uno de ellos, BI, es paralelo al eje óptico y después de refractado toma la dirección IF′ pasando por el foco-imagen F′. La imagen del punto B se encuentra sobre este rayo IF′. Otro rayo procedente del punto B se dirige hacia el foco-objeto F y llega a la lente en el punto J; según la observación anterior, este rayo, una vez refractado, es paralelo al eje óptico. Los dos rayos refractados se cortan en un punto B′, imagen del punto B. Por otra parte, si el objeto es normal al eje óptico, también lo es la imagen; la recta A′B′ es, por consiguiente, la imagen del objeto AB. Así, pues, vuelven a encontrarse los resultados experimentales del párrafo 2º: imagen invertida y menor que el objeto, situada más allá del foco-imagen. Esta construcción gráfica se realizaría de la misma forma para todos los demás casos examinados. La figura 275 representa el caso en que el objeto AB esté situado a una distancia doble de la longitud focal. Se ve inmediatamente que los triángulos rectángulos ABF y CJF son iguales a causa de la igualdad de los ángulos del vértice F y de los lados AF y FC. Resulta entonces que AB es igual a CJ y, por consiguiente, a A′B′ (lados opuestos del rectángulo CA′B′J); la imagen es igual al objeto e invertida. Los triángulos rectángulos ICF′ y B′A′F′ son iguales (IC = AB = A′B, $\widehat{IF'C} = \widehat{A'FB'}$), y por consiguiente, F′C = F′A, y la imagen está situada a una distancia de la lente igual al doble de la longitud focal; se verificarían del mismo modo gráficamente, los resultados de las experiencias citadas en los párrafos 4º, 5º y 6º.

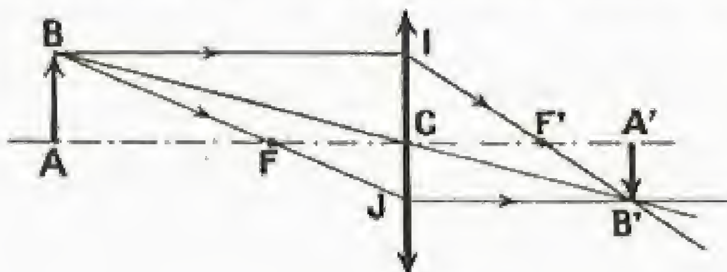


Fig. 274

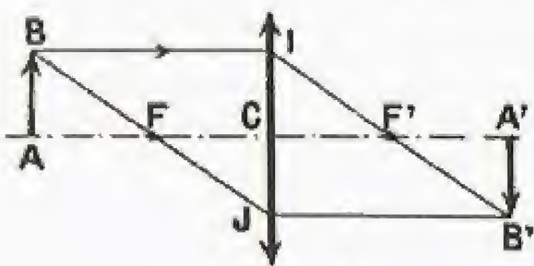


Fig. 275

Dimensión de la imagen. Aumento. — Se trata de calcular la relación $\frac{A'B'}{AB}$ entre la dimensión de la imagen y la del objeto. Los triángulos rectángulos ABF y CFJ de la figura 274 son semejantes por tener un ángulo agudo igual, por opuestos por el vértice:

$$\frac{CJ}{AB} = \frac{A'B'}{AB} = \frac{FC}{FA}.$$

Análogamente, los dos triángulos rectángulos CIF′ y A′B′F′ son también semejantes, y como IC = AB, se tendrá también

$$\frac{A'B'}{IC} = \frac{A'B'}{AB} = \frac{F'A'}{F'C},$$

lo que permite escribir

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{FC}{FA} = \frac{F'A'}{F'C} = \frac{FC + F'A'}{FA + F'C}$$

de acuerdo con las propiedades de las razones. Ahora bien, CF = CF′, y por consiguiente

$$\frac{A\,B'}{AB} = \frac{F'C + F'A'}{FA + FC} = \frac{CA'}{CA}.$$

El aumento será, pues, igual al cociente de las distancias a la lente de la imagen y del objeto.

Centro óptico de una lente. — Se denomina así, en una lente delgada, la intersección C de la lente con el eje óptico. Este punto se confundirá con los dos vértices S y S′ de la lente, y goza de una propiedad muy notable.

Unamos BC y CB′ y consideremos los dos triángulos rectángulos ABC y A′B′C (*fig.* 274); estos triángulos son semejantes por tener los catetos proporcionales:

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{CA'}{CA}.$$

De donde se deduce que los ángulos agudos son iguales. Los ángulos $\widehat{ACB}$ y $\widehat{A'CB'}$, que tienen dos lados AC y A′C en línea recta, son iguales y por consiguiente los otros lados BC y B′C están también en línea recta.

Un rayo luminoso que pasa por el centro óptico de una lente no sufre desviación alguna por refracción. Esta importante propiedad permite la obtención de un tercer rayo en la construcción de la imagen; este rayo es un verdadero eje óptico secundario.

La figura 276 representa, como ejemplo, el caso de un objeto situado entre el foco y la lente. La imagen del punto B′ debe encontrarse a la vez sobre los rayos refractados IF′ y BC. Estos rayos no se cortan, pero parecen proceder del punto B′, intersección de sus prolongaciones. El punto B′ es la imagen virtual de B; A′B′, imagen del objeto AB; por consiguiente, la imagen es virtual, derecha y mayor que el objeto.

La noción de centro óptico permite también resolver con gran sencillez el siguiente problema: encontrar la imagen de un objeto infinitamente alejado de una lente. Tomemos el caso del sol y orientemos la lente hacia este astro. La experiencia nos muestra que la imagen buscada es un círculo pequeño muy brillante situado en el plano focal. Los rayos que proceden del borde superior del sol son paralelos entre sí al llegar a la lente; uno de ellos pasa por el centro óptico C, sale de la lente sin ser desviado y alcanza el plano focal en F″ (*fig.* 277), que es la imagen del borde superior en el cual convergen los restantes rayos. Análogamente, el rayo luminoso que procede del borde inferior del sol y que pasa por el centro óptico C atraviesa la lente sin desviación

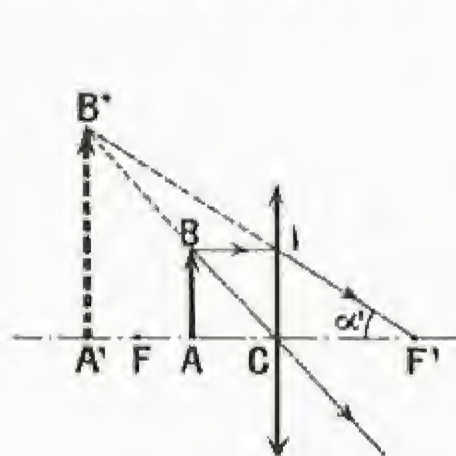


Fig. 276

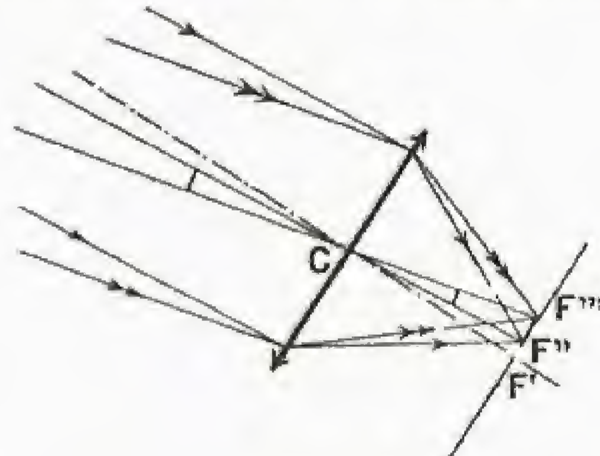


Fig. 277

y alcanza el plano focal en F‴, imagen buscada. La imagen del sol es, pues, un círculo de diámetro F″F‴ y el ángulo F″CF‴ es el diámetro aparente del sol, ángulo bajo el cual nosotros mismos vemos este astro, es decir, 32′.

Fórmulas de las lentes convergentes. — Sea de nuevo el caso representado por la figura 274. La distancia a la lente de los objetos y de las imágenes se medirá a lo largo del eje óptico, y tomaremos como sentido positivo el sentido inverso de la luz incidente, como en el estudio de los espejos. Como los focos F y F′ son puntos fijos, se trata de determinar las posiciones: la del objeto, por su distancia FA al foco-objeto F, y la de la imagen, por la distancia F′A′ al foco-imagen F′. Estas dos distancias son siempre de signo contrario. La semejanza de los triángulos ABF, CJF y A′B′F′, CIF′ ha dado ya la relación

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{FC}{FA} = \frac{F'A'}{F'C}.$$

Estas relaciones son negativas, al ser la imagen y el objeto de sentidos contrarios. De ellas se deduce la relación denominada *fórmula de Newton*

$$\overline{FA} \times \overline{FA'} = \overline{FC} \times \overline{F'C},$$

que puede escribirse, haciendo FA = π, F′A′ = π' y observando que $\overline{F'C} = -\overline{FC} = f$,

$$\pi \cdot \pi' = -f^2.$$

El empleo de esta fórmula puede ser bastante delicado a causa del doble origen de las distancias, por lo cual se prefiere con frecuencia la fórmula de Descartes, en la que se toma como origen único de distancias el centro óptico C, que se confunde con los vértices de la lente delgada. Si se escribe CA = CF + FA = p, las relaciones

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{FC}{FA} = \frac{F'A'}{F'C} = \frac{CA'}{CA}$$

se convierten en

$$CA' = CF' + F'A = p' \quad CF = -CF' = f,$$

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{-f}{p-f} = \frac{f+p'}{f} = \frac{p'}{p}$$

o, efectuando el producto de medios y de extremos de las dos primeras razones,

$$-f^2 = pf - f^2 + p'p - p'f,\ p'f - pf = pp',$$

relación que podrá escribirse, si se dividen los dos miembros por el producto $pp'f$,

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}.$$

Esta fórmula, como la del aumento $\frac{A'B'}{AB} = \frac{p'}{p}$, es análoga a la que se encontró para los espejos.

De ella pueden deducirse todos los resultados que revela la experiencia. En particular, la distancia p' de la imagen a la lente puede expresarse en función de la distancia del objeto y de la longitud focal:

$$p = \frac{-pf}{p-f} = \frac{-f}{1-\frac{f}{p}}.$$

Para un objeto real, p es siempre positiva, de donde se deduce que si el objeto está situado delante del foco, $p > f$, p' es negativo y la imagen está situada más allá del foco-imagen.

Cuando $p = 2f$, $p' = -2f$, $\frac{A'B'}{AB} = -1$.

Por último, cuando el objeto está situado entre el foco y la lente, $0 < p < f$, p' se hace positivo y mayor que p. La imagen es virtual, derecha y mayor que el objeto.

Longitud focal de una lente. — Esta magnitud característica dependerá del índice del cristal de la lente y de sus radios de curvatura.

Una lente puede considerarse como un sistema formado de dos dioptrios esféricos, que son sus dos caras. En el primer dioptrio, de radio R, el primer medio refringente es el aire, de índice 1, y el segundo, el vidrio, de índice n. El radio del segundo dioptrio es R′; su primer medio es el vidrio, de índice n, y el segundo, el aire de índice 1. Sea un punto-objeto situado en el eje óptico común a ambos dioptrios, a la distancia p del vértice S; la imagen estará situada a una distancia p_1, dada por la fórmula

$$\frac{1}{p} - \frac{n}{p_1} = \frac{n-1}{R}.$$

Esta imagen sirve de objeto virtual para el segundo dioptrio; este nuevo objeto está situado a una distancia del vértice S′ igual también a p_1, porque como la lente es delgada, pueden confundirse sus dos vértices muy cercanos. La imagen definitiva se forma a una distancia p' dada por la relación

$$\frac{n}{p_1} - \frac{1}{p'} = \frac{1-n}{R'}.$$

Sumemos miembro a miembro las dos relaciones obtenidas:

$$\frac{1}{p} - \frac{n}{p_1} + \frac{n}{p_1} - \frac{1}{p'} = \frac{n-1}{R} + \frac{1-n}{R'},$$

se obtendrá

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = (n-1)\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'}\right).$$

Es sabido que $\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$, y por consiguiente la longitud focal de la lente viene dada por su inversa:

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'}\right).$$

Para aplicar esta fórmula hay que atribuir un signo a los radios de las esferas. En virtud del convenio establecido con respecto al dioptrio esférico, se considerará positivo el radio de una esfera cuando la convexidad de la misma esté dirigida hacia la luz incidente. Así pues, en una lente biconvexa, el radio R de la primera cara es positivo, mientras que el segundo radio R′ es negativo.

En el caso de una lente planoconvexa, el radio de curvatura de la cara plana es infinitamente grande (un plano puede considerarse como una esfera de radio infinitamente grande), de forma que el término $\frac{1}{R}$ se anula si la primera superficie es plana, siendo entonces negativo el segundo radio, y positiva la longitud focal. En el caso de un menisco convergente, ambos radios son positivos o negativos según la orientación del menisco con respecto a la luz incidente.

La fórmula muestra, además, que la longitud focal no cambia cuando se invierten las caras de la lente.

Lentes divergentes. — Seguiremos en el estudio de estas lentes la misma marcha que en el caso de las convergentes. No es posible recoger en una pantalla la imagen de un objeto real, cualquiera que sea su posición con respecto a la lente.

Es posible, no obstante, ver esta imagen, que parece situada al mismo lado que el objeto con respecto a la lente, y más cerca de esta última; por consiguiente, es virtual y derecha, del mismo sentido que el objeto. Existe, también, un plano focal-imagen virtual, en el que se encuentran situadas las imágenes de los puntos infinitamente alejados de la lente. Los dos focos principales equidistan también de la lente, pero están invertidos, por hallarse el foco-objeto F a la derecha, si el sentido de la luz es de izquierda a derecha, y el foco-imagen F′ a la izquierda.

La construcción gráfica de la imagen se realiza de la misma manera que en el caso de las lentes convergentes, teniendo en cuenta la inversión de los focos. El foco divergente vendrá representado por una recta normal al eje óptico, con dos pequeñas flechas en sus extremos, tal como muestra la figura 278.

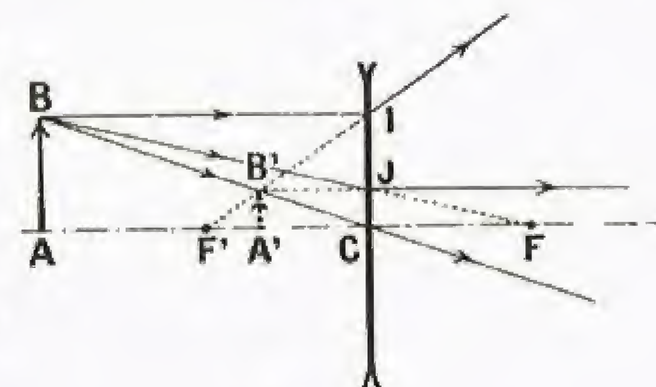


Fig. 278

Examinemos tres casos: supongamos, primero, un objeto real representado por la recta AB. Entre los rayos luminosos procedentes de B, el paralelo al eje óptico parece venir de un punto infinitamente alejado sobre el eje; atraviesa la lente saliendo de ella como si viniera del foco-imagen F′ (esta vez a la izquierda). Otro rayo procedente de B y dirigido hacia el foco-objeto (situado a la derecha) sale de la lente paralelamente al eje, sin alcanzar el punto F, proyectándose la imagen del foco-objeto al infinito. Se observa inmediatamente que estos dos rayos refractados divergen al salir de la lente, llamada por esta razón lente divergente. No se cortan, sino que parecen proceder de un punto común, intersección de sus prolongaciones. Este punto B′ es la imagen del punto B, y el objeto AB tiene por imagen la recta A′B′ virtual, menor que el objeto, con el mismo sentido y situada siempre entre el foco-imagen F′ y la lente.

El centro óptico C permite utilizar para la construcción un tercer rayo BC que, atravesando la lente sin desviarse, pasa también por el punto B′ imagen.

Examinemos ahora el caso inverso del anterior. Tomemos como objeto un objeto virtual AB situado entre el foco-objeto F y la lente (*fig.* 279). Tal objeto se obtendrá fácilmente por medio de una lente convergente auxiliar que da del objeto A_0B_0 una imagen real e invertida AB. Si colocamos delante de una imagen la lente divergente, ya no podrá formarse, constituyendo un objeto virtual. Es decir, los rayos incidentes que llegan a la lente divergente no se cortan, sino que se dirigen a los puntos del objeto AB, que es un objeto virtual.

Fig. 279

Consideremos, entre los rayos que se dirigen hacia el punto B, el paralelo al eje óptico, que sale de la lente como si viniera del foco-imagen F′ en la dirección F′I. Por otra parte, el rayo incidente que pasa por el centro óptico C y que va hacia B no se desvía al salir de la lente. Estos dos rayos luminosos se cortan en B′, imagen real del punto virtual B, de forma que el objeto virtual AB tiene como imagen real A′B, que es posible recoger en una pantalla; es derecha, mayor que el objeto y más alejada de la lente que el objeto. Estos resultados podían preverse aplicando el principio del retorno inverso de la luz. Como los rayos luminosos circulan exactamente en sentido inverso en el segundo caso y en el primero, las funciones del objeto y la imagen se invierten.

Por último, hay un tercer caso importante: el que se refiere a un objeto virtual, obtenido como anteriormente, pero situado esta vez a una distancia de la lente divergente comprendida entre una y dos veces la longitud focal (*fig.* 280). Un rayo luminoso dirigido hacia B paralelamente al eje, sale según la dirección F′I; un segundo rayo dirigido hacia B pasando por el centro óptico C, sale sin desviación. Estos dos rayos emergentes parecen venir del punto B′ y la imagen buscada es A′B′, virtual como el objeto, invertida y mayor que él.

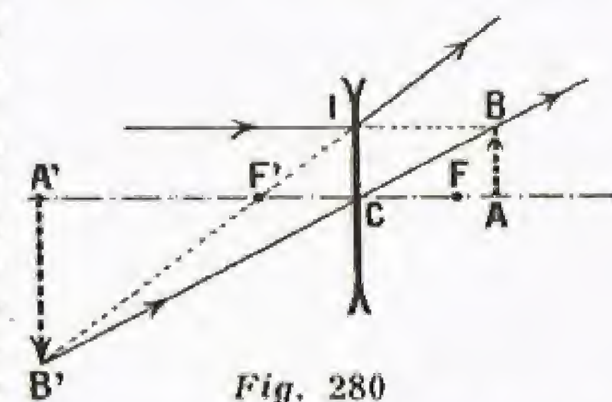


Fig. 280

Las fórmulas algebraicas que ligan las distancias p y p' del objeto y la imagen a la lente con la longitud focal f, así como esta longitud con los radios de curvatura y con el índice del vidrio, son exactamente las mismas que para las lentes convergentes:

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{p'}{p}, \quad \frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}, \quad \frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'}\right).$$

Se observará únicamente que la longitud focal es negativa. En efecto, en el caso de una lente bicóncava, por ejemplo, el radio de la primera cara, con su concavidad hacia la luz incidente, es negativo, mientras que el de la segunda cara, con su convexidad hacia la luz, es positivo.

El paréntesis $\frac{1}{R} - \frac{1}{R'}$, suma de dos términos negativos, es también negativo; lo mismo ocurre para f. Fácilmente se comprobaría el signo de la longitud focal de una lente planocóncava o de un menisco divergente.

RESUMEN. A fin de comparar las propiedades de las lentes convergentes y divergentes y de resumir los resultados del estudio, se han trazado

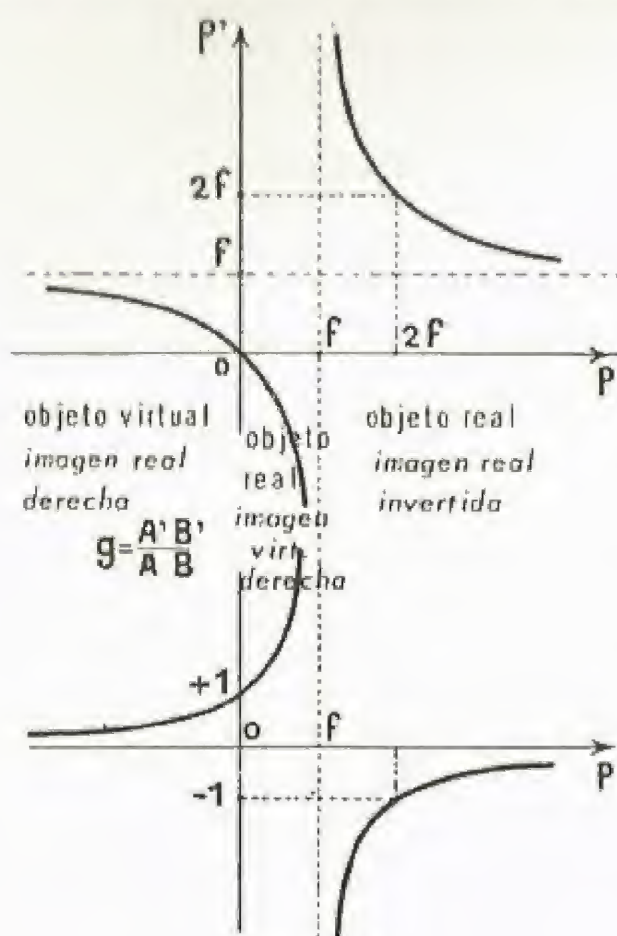


Fig. 281

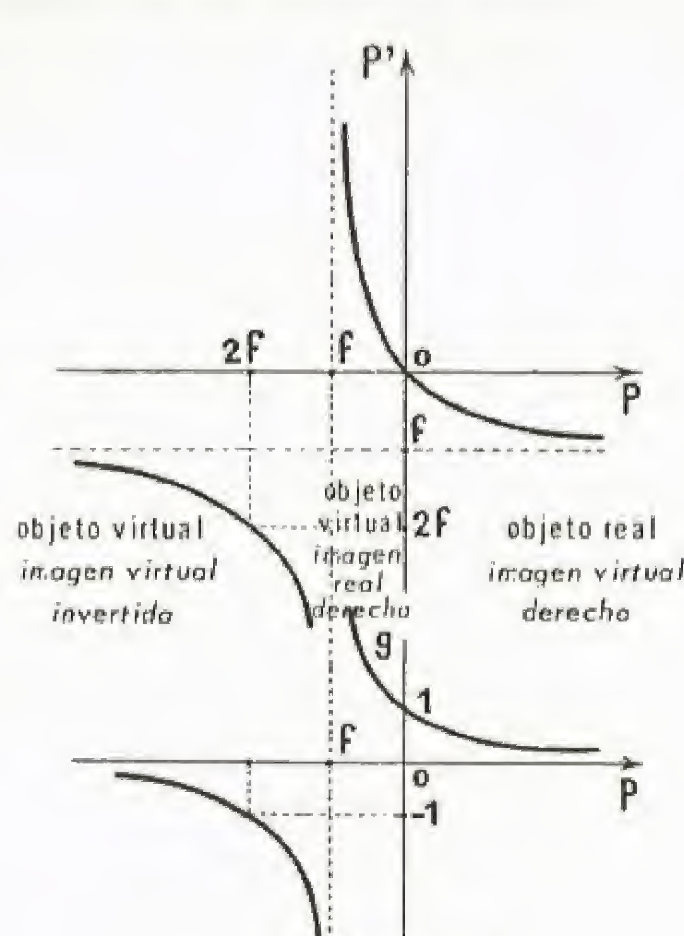


Fig. 282

en las figuras 282 y 283 las curvas que representan las variaciones de p' y del aumento lineal $g = \frac{A'B'}{AB}$ en función de la distancia p del objeto a la lente convergente (*fig.* 281) o divergente (*fig.* 282).

Asociación de lentes

Estudiaremos ahora el sistema formado por varias lentes colocadas unas detrás de otros de forma que sus ejes ópticos coincidan. El sistema así formado se denomina sistema centrado. Las lentes, supuestas siempre delgadas, pueden estar en contacto o separadas por intervalos de aire.

Sean tres lentes convergentes o divergentes de longitudes focales respectivas f_1, f_2 y f_3. Supongamos que se coloca un objeto a la distancia p de las lentes, que están pegadas unos contra otras. La primera dará una imagen situada a una distancia p_1, tal como

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p_1} = \frac{1}{f_1}.$$

Esta imagen actuará como objeto para la segunda lente y, como se supone que todas las lentes son delgadas y están unidas, este objeto virtual estará también a la distancia p_1 de la segunda lente, que a su vez dará una imagen a una distancia p_2 que podrá calcularse por la relación

$$\frac{1}{p_1} - \frac{1}{p_2} = \frac{1}{f_2}.$$

Esta nueva imagen actuará a su vez como objeto de la tercera lente, que a su vez da una imagen situada a una distancia p', de acuerdo con la ecuación

$$\frac{1}{p_2} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f_3}.$$

Si se suman las tres relaciones obtenidas, desaparecen las distancias p_1 y p_2, y quedará

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3}.$$

Esta ecuación muestra que entre la distancia p del objeto al sistema de lentes y la distancia p' de la imagen existe una relación análoga a la encontrada para una sola lente. La longitud focal F de esta lente única, que se comportaría exactamente como el sistema propuesto, sería

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3}.$$

Convergencia de una lente. — Se denomina convergencia C de una lente la inversa de su longitud focal; esta convergencia se expresa en dioptrías si la longitud focal se expresa en metros. Por ejemplo, una lente convergente de 0,25 m de longitud focal tiene una convergencia $C = \frac{1}{0,25}$, o sea cuatro dioptrías. Una lente divergente de focal $-$ 0,50 m tiene una convergencia de $\frac{1}{-0,5} = -2$ dioptrías, o sea una divergencia de dos dioptrías.

De acuerdo con el cálculo precedente, un sistema de lentes unidas es equivalente a una lente única cuya convergencia es igual a la suma algebraica de las convergencias de todas las lentes.

Cuando dos lentes que tienen un mismo eje óptico están separadas por un intervalo de aire de espesor e, el sistema sigue siendo equivalente a una lente única cuya longitud focal F vendrá expresada por la relación

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{e}{f_1 f_2},$$

o bien de convergencia C:

$$C = C_1 + C_2 - e \cdot C_1 \cdot C_2.$$

Sistema telescópico. — La longitud focal de un sistema de dos lentes depende de la distancia e que las separa. La fórmula indicada muestra que si este intervalo e es igual a una cualquiera de las longitudes focales f_1 o f_2 de las lentes, el sistema se conduce como una lente cuya distancia focal sea f_2 o f_1, es decir, una u otra de ambas lentes. Pero el caso más

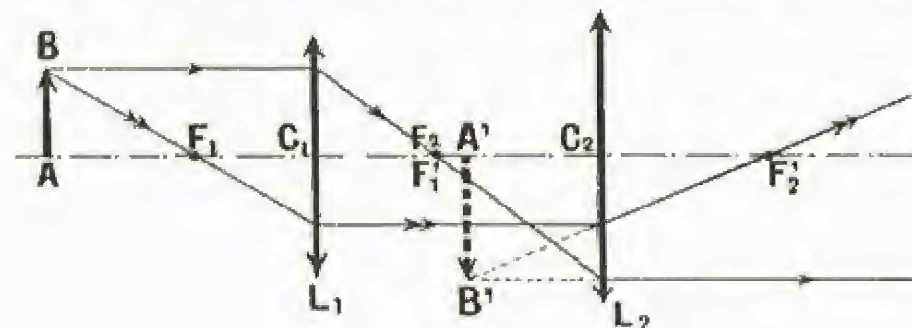


Fig. 283

interesante es aquel en que la distancia e entre las lentes es igual a la suma algebraica de las longitudes focales $f_1 + f_2$ de las dos lentes. En estas condiciones, la distancia focal F del sistema se hace infinitamente grande; en efecto,

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_1} - \frac{f_2 + f_2}{f_1 f_2} = 0.$$

Se dice que el sistema es telescópico o afocal. Tal sistema se caracteriza por un aumento constante, independientemente de la posición del objeto. La figura 283 muestra que el valor del aumento es

$$\frac{A'B'}{AB} = -\frac{f_2}{f_1}$$

Focometría

Una lente se caracteriza por su longitud focal. La focometría es el conjunto de métodos que permiten medir tal distancia, métodos que serán diferentes según que las lentes sean convergentes o divergentes.

1º *Lentes convergentes.* Basta dirigir la lente sobre un objeto muy alejado y buscar la posición que hay que dar a una pantalla para que se recoja sobre su superficie una imagen clara del objeto. La distancia entre la lente y la pantalla será la distancia buscada.

Puede también orientarse hacia el Sol, formar la imagen en una pantalla y medir rápidamente, ya la distancia de la lente a la pantalla, ya el diámetro de la imagen. Se sabe (*fig.* 277) que este diámetro es igual al producto de la longitud focal por el arco de 32′ expresado en radianes; es decir, $\frac{1}{108}$. Basta, pues, con multiplicar el diámetro de la imagen por 108 para obtener la longitud focal.

También puede disponerse un objeto luminoso a la distancia p de la lente y buscar a qué distancia p' hay que colocar una pantalla para que recoja la imagen. Entonces, se aplica la fórmula

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}.$$

Otro método, debido a Silbermann, utiliza la propiedad de que un objeto situado a distancia doble de la longitud focal da una imagen invertida y de igual dimensión al otro lado de la lente y a la misma distancia. Se busca por tanteo la posición del objeto y de la pantalla sobre la cual se forma la imagen. Cuando ésta tenga la misma dimensión que el objeto, se mide la distancia del objeto a la pantalla, que es igual a cuatro veces la longitud focal de la lente.

2º *Lentes divergentes.* Se aplica igualmente la fórmula de las lentes, pero utilizando un objeto virtual (dado por una lente convergente) situado entre el foco y la lente divergente. La imagen real es recogida en una pantalla.

Otro método consiste en unir a la lente divergente una lente convergente escogida de forma que el sistema sea también convergente. Se mide la longitud focal F del sistema; si f_1 es la distancia focal de la lente convergente, se obtendrá la focal f de la divergente por la relación

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{F} - \frac{1}{f_1}.$$

Defectos de las lentes

Las lentes, incluso delgadas, presentan defectos, denominados también *aberraciones.* Estas aberraciones pueden manifestarse de diferentes formas, según las propiedades que traten de obtenerse:

1º Si se desea obtener de un punto-objeto una imagen lo más fina posible (como sucederá con los anteojos astronómicos), habrá que corregir la *aberración de esfericidad* del sistema óptico. Esta aberración se manifiesta por el hecho de que los rayos refractados por los bordes de la lente (rayos marginales) cortan el eje óptico en puntos que están más cerca de la lente que los rayos centrales (*fig.* 284). Es imposible suprimir esta aberración con una sola lente, ya que depende del índice del vidrio, de los radios de curvatura (forma de la lente), de su orienta-

ción con respecto a la luz incidente y de la distancia del objeto. Es mínima para un objeto situado en infinito cuando el radio de la cara de entrada es seis veces menor que el de la cara de salida. En la práctica, se toma la forma planoconvexa. Para suprimir la aberración de esfericidad, hay que utilizar varias lentes.

2º Una de las aberraciones más molestas de las lentes es la *aberración cromática*; consideremos una lente convergente que da en su foco la ima-

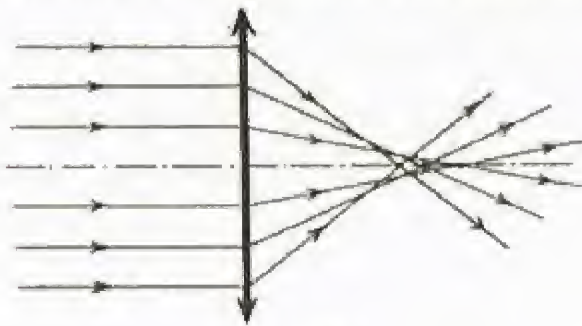


Fig. 284

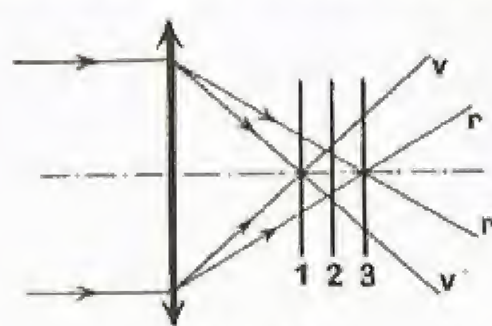


Fig. 285

gen de una fuente luminosa blanca muy alejada. Los bordes de la lente, actuando como prismas de ángulos pequeños (*fig.* 285), desvían más los rayos azules que los rayos rojos, de donde resulta que el foco de los rayos azules y violeta se encuentran más cerca de la lente que el foco de los rayos rojos. Si se coloca una pantalla en la posición 1, se obtendrá una mancha circular con bordes rojos. En la posición 2, la mancha tendrá un diámetro mínimo, pero sus bordes estarán todavía coloreados, produciendo la superposición del violeta y el rojo púrpura y rosa pálidos. En la posición 3, aparecerá en la pantalla una mancha circular con borde violeta. La distancia entre los focos de los rayos rojos y los rayos azules es relativamente considerable, variando según la naturaleza del vidrio entre $\frac{1}{60}$ y $\frac{1}{30}$ de la longitud focal.

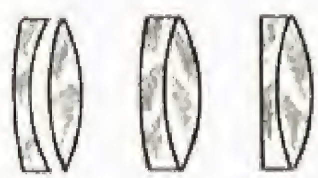


Fig. 286

Para corregir esta aberración y obtener lentes *acromáticas*, se adhieren a lentes convergentes talladas en vidrios poco dispersivos, denominados *crowns*, lentes divergentes de vidrios muy dispersivos, los *flints*, constituidos a base de silicato de plomo, como el cristal. En la figura 286 pueden verse algunos tipos de lentes acromáticas corregidas también de la aberración de esfericidad.

3º Las otras aberraciones tienen de particular que dependen no solamente de la posición del objeto y de la forma de la lente, sino también de la posición y de la abertura del diafragma que pueda acompañar a la lente. En primer lugar, la imagen de un objeto plano perpendicular al eje óptico es una superficie curva de revolución alrededor de este eje. Si sobre una pantalla plana perpendicular al eje se recibe la imagen de un cuadrado, puede obtenerse una figura cuyos lados son más o menos abombados en forma de media luna, o bien en forma de tonel (*fig* 287); esta aberración se llama *distorsión*, y es debida a que el aumento lineal varía al alejarse del eje.

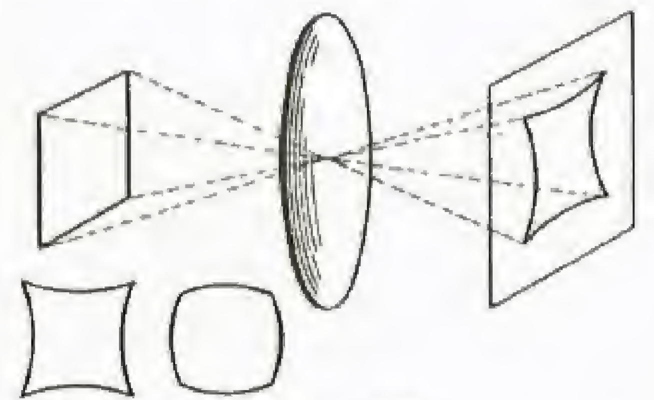


Fig. 287

Señalaremos, finalmente, la última aberración: el *astigmatismo*, que se manifiesta principalmente si se toma como objeto un plano en el que se han trazado círculos centrados en el eje y radios salidos del centro. Es imposible ajustar en una pantalla plana (*figs.* 288 y 289), círculos y radios al mismo tiempo.

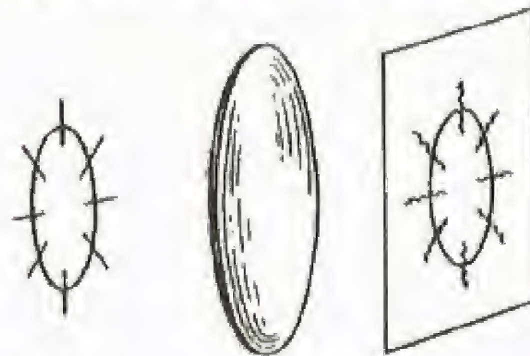


Fig. 288



Fig. 289

Se logra corregir más o menos todas estas aberraciones utilizando varias lentes de vidrios diferentes adheridas o separadas por intervalor de aire, y disponiendo el diafragma convenientemente, ya delante, detrás o entre las lentes.

Fotografía - Aparato de proyección

Cámara obscura fotográfica. Objetivo fotográfico. Principios de la fotografía. Aparato de proyección

Cámara obscura fotográfica. Objetivo fotográfico. — Si el diafragma de la cámara obscura, que tiene un orificio, se reemplaza por un sistema óptico convergente, se obtiene sobre el vidrio esmerilado una imagen bastante brillante de los objetos que se colocan delante de la cámara. El vidrio esmerilado puede ajustarse modificando la profundidad de la cámara hasta el momento en que la imagen presente el máximo de claridad. Evidentemente, es imposible obtener una imagen clara de objetos situados a distancias demasiado diferentes del sistema óptico convergente denominado objetivo.

Los objetivos no son nunca lentes sencillas; se caracterizan por su longitud focal, que está siempre indicada en la montura, y por su abertura, es decir, el cociente entre la longitud focal y el diámetro del haz luminoso de mayor anchura que puede penetrar por el objetivo. Por ejemplo: en una placa de formato 9 cm × 12 cm, se utilizan objetivos de longitud focal 13,5 cm, cuya abertura o cociente de abertura puede ser $\frac{1}{6,3}$, $\frac{1}{4,5}$, etc., es decir, que admiten haces cuyo diámetro es igual a $\frac{13,5}{6,3}$ o a $\frac{13,5}{4,5}$. El diámetro del diafragma, cuando es exterior al objetivo, o de la imagen del diafragma por la parte anterior del objetivo, cuando el diafragma está situado entre las lentes, es la abertura del objetivo.

Los objetivos se clasifican según sus cualidades o el grado de las correcciones relativas a la aberraciones. Se encuentran *objetivos acromáticos*, formados por dos lentes, una convergente y otra divergente, adheridas, asociadas a un diafragma colocado ante ellas (*fig.* 290). Están corregidos de las aberraciones esféricas y cromáticas. Aparecieron después los *objetivos rectilíneos*, formados por dos grupos de lentes adheridas, dispuestas simétricamente con respecto al diafragma (*fig.* 291). En estos objetivos se ha tratado de corregir, además de las aberraciones de esferidad y cromáticas, la distorsión; actualmente se utilizan casi exclusivamente los denominados *anastigmáticos*, que a las anteriores cualidades añaden una corrección casi perfecta del astigmatismo del aplanetismo de la imagen. La figura 293 muestra algunos de los tipos de anastigmáticos más empleados. Han podido obtenerse valores muy grandes de abertura, de $\frac{1}{3,5}$, $\frac{1}{2}$ e incluso $\frac{1}{1,5}$. Es evidente que la cantidad de luz que penetra en el objetivo y que contribuye a la formación de la imagen es tanto mayor cuanto mayor es la abertura. La luminosidad de los objetivos, proporcional a su superficie útil, es, pues, proporcional al cuadrado de la abertura. Así, un objetivo abierto a $\frac{1}{6,3}$ es tres veces menos luminoso y tres veces menos rápido que un objetivo $\frac{1}{3,5}$, porque $6,3^2 : 3,5^2 = 3,2$.



Fig. 290

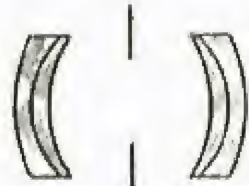


Fig. 291

Otra cualidad de los objetivos, de gran importancia, es el *campo*. Cuando se monta un objetivo fotográfico en una cámara obscura muy grande, se comprueba, después de ponerla cuidadosamente a punto, que la imagen sólo es perfectamente clara en el interior de un círculo sobre el vidrio esmerilado. Todos los objetos situados en el interior de un cono cuyo vértice es el centro óptico del objetivo y cuya base es el círculo se hallan dentro del *campo del instrumento* (*fig.* 293). La placa fotográfica o la superficie sensible, que deben estar cubiertas, deben inscribirse en el interior del círculo, cuyo diámetro debe ser ligeramente superior a la diagonal de la placa. Para los buenos objetivos de abertura media, el campo es de cerca de 60º; para los objetivos abiertos a $\frac{1}{3,5}$, no es más que de 53º, y sólo de 45º para los objetivos muy abiertos, de $\frac{1}{2}$. Se construyen, en cambio, objetivos especiales, denominados *grandes angulares*, que tienen un campo considerable y una abertura relativamente pequeña, de $\frac{1}{12}$ a $\frac{1}{9}$ como máximo. Su campo puede alcanzar 90 e incluso 100º.

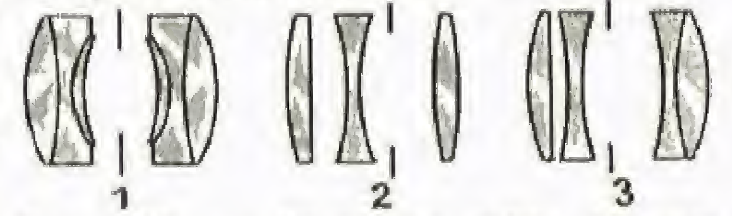


Fig. 292. — Diversos tipos de objetivos: 1. Anastigmático simétrico; 2. Triplete de Cooke; 3. Tessar Zeiss

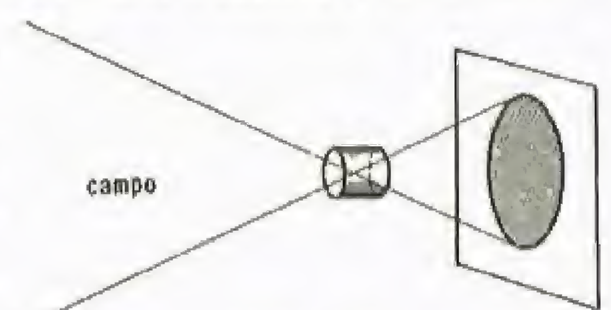
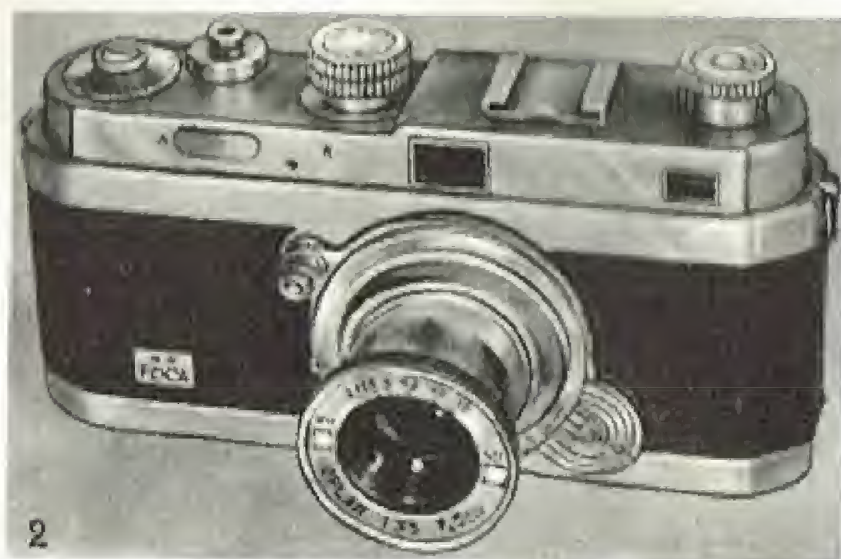


Fig. 293

Toda la luz que llega a un objetivo, lente o prisma no se transmite íntegramente, sino que el vidrio absorbe una parte pequeña (1 × 100 por centímetro atravesado), perdiéndose otra cantidad por reflexión hacia la luz incidente (aproximadamente el 8 por ciento para una lente simple). En un objetivo formado por varias lentes, las pérdidas por reflexión son importantes. Para reducirlas, se cubre la superficie de vidrio con una capa muy delgada (de unas décimas de micra) de una substancia transparente cuyo índice de refracción sea muy bajo (1,4). Esta capa superficial contra los reflejos se deposita mediante evaporación de fluoruro de magnesio en un vacío muy avanzado. Los vidrios así tratados presentan un reflejo azulado característico.





APARATOS FOTOGRÁFICOS: 1. Tipo «Reflex» con dos objetivos. 2. Tipo normal 24 × 36, Foca

Principios de la fotografía. — Dispongamos una superficie plana, sensible a la luz, en lugar del vidrio esmerilado. Si la imagen es muy brillante (objeto muy luminoso, objetivo muy abierto), bastará exponer la superficie durante muy breve tiempo para obtener una impresión que podrá luego revelarse (v. FOTOGRAFÍA, pág. 226).

Aparato de proyección. — Iluminemos intensamente una fotografía diapositiva sobre vidrio o película; puede servir de objeto para un objetivo análogo al objetivo fotográfico, de forma que podrá obtenerse sobre una pantalla blanca de grandes dimensiones una imagen invertida y muy aumentada del objeto (que se ha colocado al revés para que su imagen se vea al derecho). Para iluminar la placa que se va a proyectar se utiliza una fuente luminosa muy intensa, de la menor dimensión posible: arco eléctrico, lámpara eléctrica denominada "de proyección", con un filamento de 500, 1 000 ó 2 000 bujías. Esta fuente se coloca en una especie de linterna de chapa, y para que la luz emitida vaya primeramente sobre el positivo que va a proyectarse y después sobre la pantalla a través del objetivo, se dispone detrás de la fuente un espejo cóncavo y detrás del cliché un sistema de lentes de gran diámetro. Estas lentes constituyen el *condensador de luz*. Es evidente que se obtendrá el rendimiento luminoso máximo cuando toda la luz que salga del condensador atraviese el objetivo de proyección, lo que exige que la imagen que dé el condensador de la fuente luminosa esté en el propio objetivo (*fig.* 294).

Los objetivos de proyección tienen la mayor abertura posible (hasta $\frac{f}{2}$); pertenecen a un tipo de objetivo fotográfico debido a Petzval (1842). Este objetivo tenía un campo bastante limitado, pero una abertura notable para aquella época.

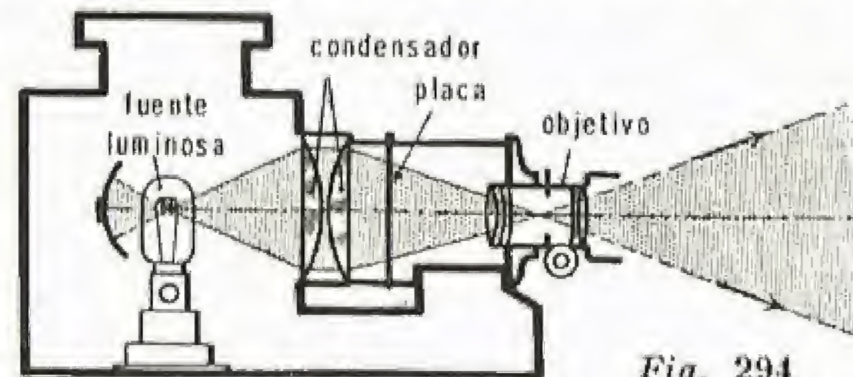


Fig. 294

El ojo

Descripción del ojo. Acomodación. Defectos del ojo: Miopía, hipermetropía y presbicia. Visión binocular

Descripción del ojo. — El ojo tiene forma esférica —globo ocular— de 27 mm, aproximadamente, de diámetro, ligeramente abombada en su parte anterior; la envoltura externa es una membrana blanca y resistente, denominada *esclerótica*, que en su parte anterior se hace transparente, constituyendo la *córnea*. En su interior hay una membrana de color obscuro denominada *coroides*, que tapiza interiormente la esclerótica; la coroides se separa de la esclerótica en el parte anterior, constituyendo el *iris*, diafragma cuya pigmentación determina el color de los ojos, y que tiene en su centro una abertura circular llamada *pupila*; el iris, además de actuar como diafragma de los rayos a fin de que en la formación de la imagen sólo intervengan los rayos centrales, regula también la intensidad de la luz que penetra en el ojo, aumentando o disminuyendo el diámetro de la pupila desde 2 mm en pleno sol a 5 mm en la obscuridad. Detrás del iris, y en contacto inmediato con él, se encuentra el *cristalino*, lente biconvexa de estructura compleja, cuyas caras tienen diferente curvatura, algo más convexa la cara posterior, y cuyo índice de refracción aumenta de la periferia al centro, siendo su valor medio 1,40; el diámetro del cristalino es de, aproximadamente, 10 mm. Está sostenido, en su posición de equilibrio, por una membrana elástica denominada zona o zónula de Zinn.

En el fondo del ojo, la coroides está cubierta por un ensanchamiento de las fibras del nervio óptico, cuyos terminales están constituidos por células cónicas (conos) o cilíndricas (bastoncitos), que constituyen la *retina;* estas células nerviosas son las que transmiten al cerebro, a través del nervio óptico, la sensación de luz, siendo los conos los más sensibles. La diferente distribución de los conos y bastoncitos hace que la retina tenga distinta sensibilidad de unos puntos a otros; la parte más sensible es la opuesta directamente a la pupila, llamada, por su coloración, mancha amarilla (*mácula lutea*); de unos 2 mm de diámetro, presenta en su centro una pequeña depresión o cavidad denominada *fobea central*, constituida casi exclusivamente por conos. En el punto donde el nervio óptico penetra en la retina faltan casi por completo los conos y los bastoncitos, por lo cual es completamente insensible a la luz; este punto se denomina punto ciego (*punctum coecum*, punto O de la figura 295). El cristalino y la zónula forman un tabique que divide el globo ocular en dos regiones de tamaño diferente; la región o cámara anterior, que es la menor, está llena de un líquido claro, denominado humor acuoso, de índice 1,336, próximo al del agua; la región o cámara comprendida entre el cristalino y la retina contiene una substancia transparente, casi gelatinosa, denominada cuerpo o humor vítreo, cuyo índice es algo superior al del humor acuoso.

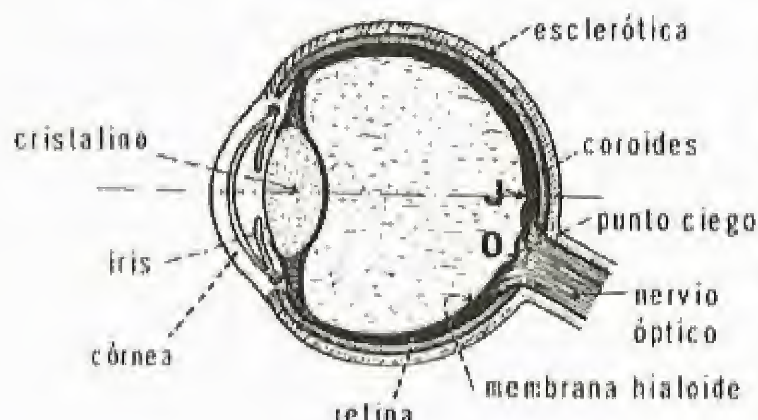


Fig. 295

Acomodación. — Desde el punto de vista óptico, el ojo puede considerarse como un sistema equivalente a un dioptrio esférico (ojo reducido de Listing) de 5 mm de radio, que separa el aire de otro medio cuyo índice sería sensiblemente el del agua; el conjunto córnea-cristalino actúa como una lente convergente única, cuyos focos principales, en un ojo adulto normal, están por término medio a 13 mm delante de la córnea. Para objetos cercanos al ojo, situados entre algunos metros y 0,30 m las imágenes se forman detrás del foco, es decir, detrás de la retina, a pesar de lo cual podemos distinguirlos claramente. Esto se debe a que el cristalino no es una lente absolutamente rígida e indeformable, sino que sus capas periféricas son relativamente blandas, de forma que sin moverse de su sitio puede modificar la curvatura de sus caras, principalmente de la anterior, por la acción del músculo ciliar, insertado en la región en donde se separa la esclerótica de la coroides, donde nace el iris. Es posible calcular la nueva distancia focal f' para que pueda verse con claridad un objeto situado a 0,25 m del ojo, cuya imagen se forma sobre la retina, situada siempre a 15 mm del centro óptico, que no ha variado sensiblemente

$$\frac{1}{250} + \frac{1}{15} = \frac{1}{f'},$$

lo que nos da $f' = 14$ milímetros.

Esta capacidad del ojo de poder adaptar la convergencia del cristalino a la distancia del objeto se denomina *acomodación*, y se desarrolla desde la primera infancia. El poder de acomodación no es ilimitado, y varía con la edad; en el ojo normal o emétrope, el objeto tiene que estar situado a una distancia de 15 a 25 centímetros del ojo, denominado mínima distancia de la visión distante, y el lugar en que está situado el objeto se denomina punto próximo *(punctum proximum)*, denominándose *punto remoto* el lugar más lejano en que puede situarse el objeto para ser visto con claridad, que en el ojo normal es el infinito. Por consiguiente, la distancia máxima de la visión distante es infinita.

Defectos del ojo. Miopía, hipermetropía y presbicia. — Si el diámetro del globo ocular es demasiado largo, o si la córnea tiene una curvatura demasiado acentuado, o también si el cristalino es demasiado convergente, los rayos luminosos forman sus imágenes delante de la retina y, por consiguiente, el ojo no ve con claridad los objetos situados lejos; en cambio, los objetos cercanos, que a falta de acomodación tienen sus imágenes más alejadas del cristalino, pueden formarse sobre la retina, y estos objetos más próximos pueden verse con claridad. Este defecto de la visión se denomina *miopía* (*fig.* 296).

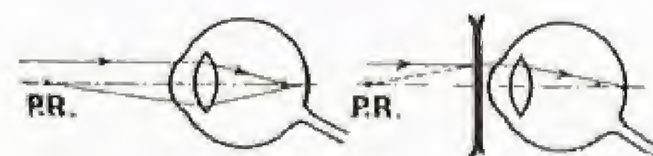


Fig. 296

Cuando, al contrario, el diámetro del globo ocular es demasiado corto, o la córnea está poco abombada, o el cristalino no es bastante convergente, la imagen de los puntos alejados se forma detrás de la retina; en esto consiste la *hipermetropía* (*fig.* 297). Gracias a la capa-

cidad de acomodación, el hipermétrope puede hacer su cristalino más convergente y ver todavía netamente los objetos alejados, pero no puede a pesar de todo ver con claridad los objetos cercanos. Averigüemos



Fig. 297

en dónde está situado el punto remoto de un hipermétrope: así se denomina el punto que forma su imagen exactamente sobre la retina en ausencia de toda acomodación. Los rayos paralelos que convergen después de la refracción detrás de la retina, son rayos ya convergentes, es decir, dirigidos hacia el punto objeto virtual PR, que podrán converger, detrás del cristalino, sobre la retina. El punto remoto es por consiguiente virtual, y está situado en PR, detrás del ojo. Para corregir la hipermetropía es necesario que, sin acomodación, los rayos procedentes de los puntos alejados parezcan pasar por PR, para lo cual se colocará ante el ojo una lente convergente cuyo foco-imagen estará situado en el punto remoto. En cuanto a los objetos cercanos, se verán con nitidez gracias a la capacidad de acomodación.

La pérdida progresiva de la facultad de acomodación del ojo es la *presbicia*; para leer, por ejemplo, hay que alejar el libro, y entonces la imagen retiniana disminuye, no pudiéndose ya distinguir los detalles. La agudeza visual, por consiguiente, disminuye.

La hipermetropía y la presbicia se corrigen con lentes convergentes, pero los fenómenos no son idénticos. Los miopes y los hipermétropes pueden ser también présbitas, y entonces necesitarán unas lentes para ver de cerca y otras para ver de lejos.

Indicaremos, por último, otro defecto de la visión: el *astigmatismo*. Cuando las superficies de la córnea y el cristalino no son de revolución alrededor del eje óptico del ojo, es imposible ver simultáneamente con nitidez todas las horas marcadas en el cuadrante de un reloj. Si, por ejemplo, el diámetro II-VIII se ve con gran claridad, el diámetro XI-V se verá borroso, defecto que se corrige con lentes cilíndricas.



Fig. 298

Visión binocular. — Cuando se mira un objeto cercano, se le observa con los dos ojos; las imágenes retinianas se forman ambas sobre las manchas amarillas, y los ejes ópticos convergen hacia este objeto (*fig.* 298). Somos conscientes de esta convergencia, que va acompañada además por una acomodación tanto mayor cuanto más próximo esté el objeto, siendo también mayor la convergencia. La experiencia adquirida desde la primera infancia nos ha enseñado a ligar la distancia de los objetos con la convergencia ocular y con la acomodación. Cuando nos encontramos ante una escena, nuestros ojos, al girar rápidamente en sus órbitas gracias a los músculos oculares, fijan sucesivamente los diferentes objetos. De la comparación de las convergencias, realizada instintivamente, resulta una especie de percepción del relieve.

Las dos imágenes retinianas no son idénticas, puesto que los puntos de vista, los ojos, distan entre sí 6,5 cm por término medio. Coloquemos ante los ojos, a 0,50 m aproximadamente, una gran lámina de vidrio y mantengamos la cabeza fija: dibujemos después, sobre el vidrio, las dos perspectivas que representan la escena contemplada por cada ojo (*fig.* 299). Si colocamos después la lámina con los dos dibujos ante una pared blanca —contemplando con el ojo derecho solamente el dibujo de la derecha, y con el izquierdo el dibujo de la izquierda—, se comprueba que percibimos el relieve, y se reconstituye la escena.

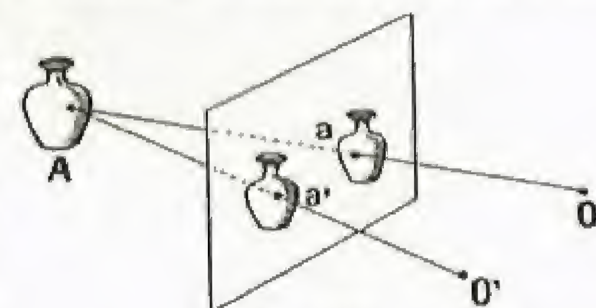


Fig. 299

La experiencia nos ha enseñado, en efecto, que los objetos colocados ante nuestros ojos son en general únicos, sin que haya dos rigurosamente análogos. Si el ojo derecho fija el punto *a* que corresponde a A, el ojo izquierdo fijará simultáneamente *a'*, y ambos ojos tomarán una convergencia igual a la que tenían ante el propio objeto A. Las imágenes retinianas de *a* y *a'* se fundirán y tendremos la impresión de un objeto A en relieve a la distancia en que estaba situado efectivamente el objeto real. Este mecanismo se denomina *estereoscopia*. Se toman dos listas con dos objetivos distintos separados por la distancia media entre los dos ojos: 65 milímetros. La fotografía positiva, obtenida generalmente sobre vidrio, se mira por un estereoscopio compuesto por dos lentes convergentes que distan también 65 mm y cuya longitud focal es la misma que la de los objetivos. Las dos lentes dan dos imágenes virtuales, situadas lo suficientemente alejadas para que el ojo pueda observarlas sin fatiga. Se produce el fenómeno explicado anteriormente: los ojos que fijan las imágenes de un mismo objeto adoptan cierta convergencia e imaginan la existencia de un objeto en relieve en la intersección de los ejes ópticos oculares (*fig.* 300). Operando así para todos los puntos de las dos fotografías que forman lo que se llama un par estereoscópico, reconstituyen el relieve de la escena fotografiada.

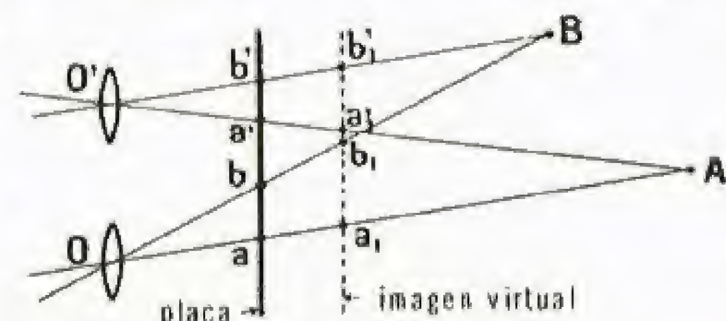


Fig. 300

La lupa - El microscopio

Definición del aumento. Potencia de una lupa. Microscopio

Definición del aumento. — Cuando se quieren examinar los detalles de un objeto, lo aproximamos al ojo. De esta forma se obtiene una imagen mayor sobre la retina. En efecto (*fig.* 301), la distancia del centro óptico C del ojo a la retina es siempre de 15 milímetros; *ab* imagen de AB es la intersección de los rayos AC y AB con la retina. Como los dos triángulos ABC y *abc* son semejantes, las bases *ab* y AB son proporcionales a las alturas, que son respectivamente 15 mm y la distancia D:

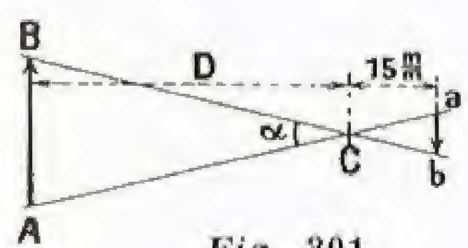


Fig. 301

$$\frac{ab}{AB} = \frac{15\text{ mm}}{D} \quad \text{o} \quad ab = 15\text{ mm} \times \frac{AB}{D}.$$

Ahora bien, la distancia D no puede ser menor que aquélla para la cual la acomodación es máxima. Esta distancia mínima de visión neta es de veinticinco centímetros, por término medio, y permite el examen bastante prolongado de los objetos sin fatiga excesiva del ojo.

Hemos visto que una lente convergente da una imagen virtual derecha y aumentada de un objeto real siempre que se coloca el objeto entre el foco y la lente. Veamos si este dispositivo es ventajoso. Coloquemos el ojo en el foco-imagen F' (*figura* 302); en lugar del objeto AB, ve la imagen A'B', que se encuentra a la distancia A'F'. La dimensión de la imagen retiniana correspondiente es $a'b' = 15\text{ mm} \times \frac{A'B'}{A'F'}$, pero a causa de la semejanza de los triángulos rectángulos A'B'F' y CIF':

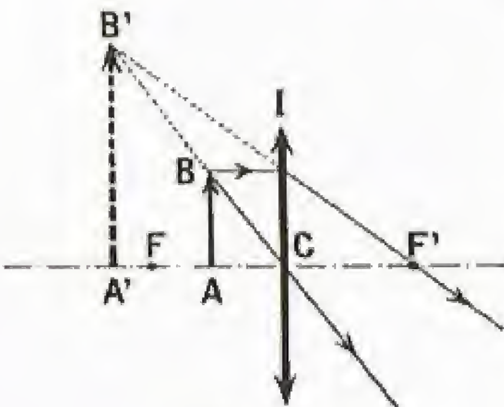


Fig. 302

$$\frac{A'B'}{A'F'} = \frac{CI}{CF'};$$

teniendo en cuenta que CI = AB y que CF' es la longitud focal *f* de la lente,

$$a'b' = 15\text{ mm} \cdot \frac{AB}{f};$$

si el objeto se contemplara a simple vista, la imagen retiniana sería, a lo sumo, de

$$ab = 15\text{ mm} \cdot \frac{AB}{250\text{ mm}},$$

puesto que la distancia mínima de la visión neta es de 25 cm o 250 mm.

Para que la observación a través de una lente convergente sea ventajosa, lente que en este caso se denomina *lupa*, es necesario que *a'b'* sea mayor que *ab*:

$$15 \times \frac{AB}{f} > 15 \times \frac{AB}{250};$$

lo que da la condición fundamental

$$f < 250\text{ mm}.$$

Una lente convergente sólo servirá como lupa cuando su longitud focal sea inferior a veinticinco centímetros, lo que corresponde a una convergencia superior a cuatro dioptrías. Se llama *aumento* de la lupa al cociente $\frac{a'b'}{ab}$ entre las imágenes retinianas obtenidas mediante la lupa y las obtenidas a simple vista en condiciones óptimas. Las fórmulas anteriores muestran que este aumento G es igual a

$$G = \frac{a'b}{ab} = \frac{250}{f},$$

estando la longitud focal *f* expresada en milímetros. Si la convergencia se expresa en dioptrías, se tendrá

$$G = 0{,}25\text{ m} \times C = \frac{C}{4}.$$

Una lente de 20 dioptrías, por ejemplo, tiene 50 mm de distancia focal y constituye una lupa de aumento 5.

Obsérvese que al ser la longitud del objeto AB pequeña comparada con la distancia D, el cociente $\frac{AB}{D}$ (*fig.* 301) representa el ángulo, expresado en radianes, bajo el cual se ve el objeto AB desde el punto C (el ojo). Este ángulo α (alfa), es el que se denomina *diámetro aparente* del objeto. La introducción de este ángulo simplifica las fórmulas. La dimensión de la imagen formada sobre la retina en milímetros *ab* es igual al producto por 15 del diámetro aparente α bajo el cual se ve el objeto. Ejemplo: si el objeto AB tiene 5 centímetros y está situado a un metro del ojo, su diámetro aparente es $\alpha = \frac{5}{100} = \frac{1}{20}$ de radián, correspondiéndole una imagen retinana de $15 \times \frac{1}{20} = 0{,}75$ mm.

El cociente $\frac{A'B'}{A'F'}$ representa, puesto que el ojo se supone colocado en F', el ángulo bajo el cual se ve la imagen A'B': es el diámetro aparente α' de la imagen. El aumento es, por consiguiente, el cociente entre el diámetro aparente de la imagen observado a través de la lupa y el diámetro aparente máximo α del objeto observado a simple vista: $G = \frac{\alpha'}{\alpha}$. Si el ojo está más cerca de la lupa, el aumento es algo mayor, disminuyendo cuando el ojo está más lejos que el foco F'.

Obsérvese también que mientras que el ojo se encuentra en el foco F', el diámetro aparente α' de la imagen no depende de la posición de ésta, ya que el punto B' se encuentra situado siempre en la recta IF'.

Potencia de una lupa. — Suele considerarse a veces, en vez del aumento, la *potencia* de la lupa, que se define como el ángulo bajo el cual se ve a través de la lente la unidad de longitud del objeto; se tendrá

$$P = \frac{\alpha'}{AB};$$

ahora bien, en el triángulo ICF', α' es igual a $\frac{CI}{CF'} = \frac{AB}{f}$, y por consiguiente, $P = \frac{AB}{f} : AB = \frac{1}{f}$.

La potencia de una lupa se expresa en dioptrías cuando la distancia focal se expresa en metros, y $P = 4G$.

Se han construido diferentes tipos de lupas; unas son simples lentes convergentes, otras son sistemas de lentes; algunas están compuestas por dos lentes y forman dobletes; en la figura 303 se ven algunas formas de lupas, entre ellas la lupa de Stanhope, que es una varilla de vidrio una de cuyos extremos es plano y el otro esférico.

Fig. 303. — LUPAS DIVERSAS: 1. Lupa simple; 2. Lupa compuesta; 3. Doblete; 4. Lupa de Stanhope

Microscopio. — Cuando se quiere obtener grandes aumentos, es necesario fabricar lupas de distancias focales muy pequeñas, es decir, de dimensiones muy pequeñas, pero su empleo sería muy incómodo, y entonces se utiliza un dispositivo óptico atribuido a un óptico de Middelbourg, Zacharie Jansen, en 1590. Este dispositivo, llamado *microscopio*, consta esencialmente de dos lentes convergentes L_1 y L_2, la primera de las cuales da una imagen real invertida, y mucho mayor, A'B', que el objeto AB, que se ha colocado a una distancia de L_1 comprendida entre una y dos veces su longitud focal; la segunda lente, L_2, que actúa como una lupa con respecto a la imagen real A'B', da una imagen A"B", virtual, del mismo sentido y todavía mayor que A'B', para lo cual la imagen real A'B' se coloca entre el foco y la lente L_2 (*fig.* 304).

Fig. 304

En otros términos: el microscopio aumenta en dos tiempos: la primera lente, próxima al objeto, se denomina *objetivo*, y proporciona una imagen real invertida y aumentada que toma la segunda lente, detrás de la cual se coloca el ojo: de ahí el nombre de *ocular* con que se ha designado. El ocular, actuando como una lupa, da una imagen focal virtual, muy grande, e invertida con respecto al objeto.

En realidad, el objetivo y el ocular no son nunca lentes sencillas, que, por padecer muchas aberraciones, darían imágenes defectuosas. Más adelante se describirán los diferentes tipos de objetivos y de oculares, que se fijan en los extremos de un tubo. La longitud focal F del conjunto viene dada, si llamamos f_1 y f_2 a las longitudes focales del objetivo y del ocular, y *e* a su distancia, por la relación

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{e}{f_1 f_2}.$$

Por ejemplo, sea $f_1 = 5$ mm, $f_2 = 25$ mm, $e = 160$ mm:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{5} + \frac{1}{25} - \frac{160}{125} = \frac{130}{125}.$$

La longitud focal es inferior a un milímetro. Se ha llegado a obtener una longitud focal extraordinariamente corta de una décima de milímetro; el microscopio representa, pues, un progreso considerable sobre la lupa.

El *aumento* y la *potencia* se definen lo mismo que para la lupa. Admitiendo para distancia mínima de visión neta 250 mm, $G = \frac{250}{F}$ y la potencia $P = 4G = \frac{1}{F}$, en dioptrías.

En el ejemplo anterior, $G = 250$, $P = 1\,000$, se alcanza un máximo de 2 500 para el aumento y de 10 000 para la potencia.

Fig. 305. — Microscopios modernos

Los microscopios modernos llevan un pie que soporta una platina sobre la cual se coloca el objeto que va a examinarse. Esta platina está perforada con un orificio, y el objeto, que se examina por transparencia, se fija sobre una lámina de vidrio denominada *porta-objeto*. La luz se dirige hacia el objeto mediante un espejo cóncavo, aumentándose su concentración frecuentemente con un condensador. El objetivo está atornillado en el extremo de un tubo en cuyo otro extremo lleva el ocular. Para ponerlo a punto, se desciende el tubo por medio de un sistema de piñón y cremallera; otro movimiento, el movimiento lento, permite desplazar el tubo distancias muy pequeñas, del orden de algunas milésimas de milímetro. Una articulación situada en el pie del instrumento permite inclinarlo, para que la observación se haga con más comodidad. En la figura 305 representamos microscopios modernos, uno de los cuales, que lleva dos tubos, se denomina binocular, y permite observar con dos ojos, lo que disminuye la fatiga.

Los objetivos de microscopio son acromáticos para dos o incluso tres radiaciones (apocromáticas) y corregidos de las demás aberraciones; sus longitudes focales varían entre 16 mm (objetivos débiles) y 2 mm (objetivos fuertes); pueden substituirse mutuamente, de forma que con el mismo instrumento, una serie de objetivos y otra de oculares, se obtienen combinaciones que ofrecen una gran variedad de aumentos. En la figura 306 se observan con detalle las secciones de objetivos diferentes que muestran la complejidad que puede alcanzar la construcción de estos sistemas ópticos. Separan puntos tanto más cercanos cuanto mayor es su abertura: de ahí el interés de la abertura numérica grabada sobre cada objetivo. Se denomina así al producto *n* sen *u*, siendo *n* el índice de refracción del medio en que se encuentra el objeto, y *u* la semiabertura angular del objetivo. En los objetivos ordinarios, llamados "a seco", el objeto está situado en el aire, $n = 1$, pero para aumen-

Fig. 306. — CORTES DE DIVERSOS OBJETIVOS DE MICROSCOPIOS: 1. Foco de 18 mm; 2. Foco de 4,4 mm; 3. Foco de 2,9 mm

tar la abertura numérica se construyen objetivos de inmersión que necesitan se deposite una gota de aceite de cedro entre el objeto y el objetivo, siendo entonces n igual a 1 515, y pudiendo separarse puntos cuya distancia es todavía menor.

Los oculares de microscopio son dobletes (*fig.* 307), denominados *dobletes de Huygens*, u oculares compensadores encargados de compensar las aberraciones residuales que todavía presentan los objetivos.

Es importante medir el aumento de un microscopio. Se consigue colocando sobre el ocular un paralelepípedo pequeño de vidrio denominado "cámara clara", que permite observar a la vez una escala graduada en milímetros, colocada a 25 centímetros del ojo, y la imagen a través del microscopio (*fig.* 308) de un micrómetro objetivo dividido en centésimas de milímetro. Si, por ejemplo, una división observada a través del microscopio abarca 5 mm, el aumento será de

$$\frac{5}{\frac{1}{100}} = 500.$$

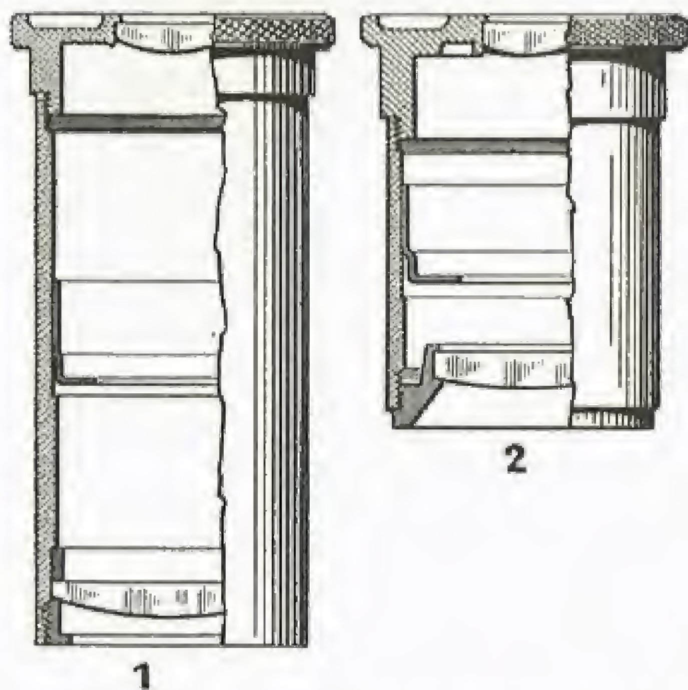


Fig. 307. — Oculares de microscopios: 1. Ocular de Huygens de 50 mm; 2. Ocular de Huygens de 25 mm

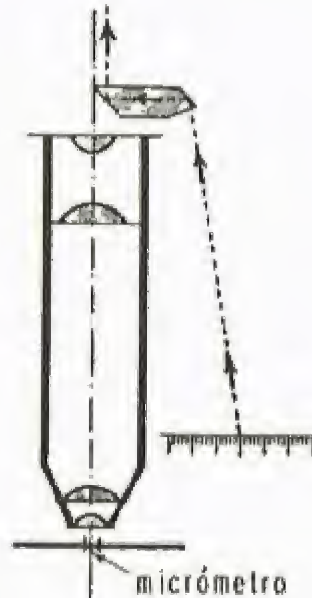


Fig. 308.— Micrómetro

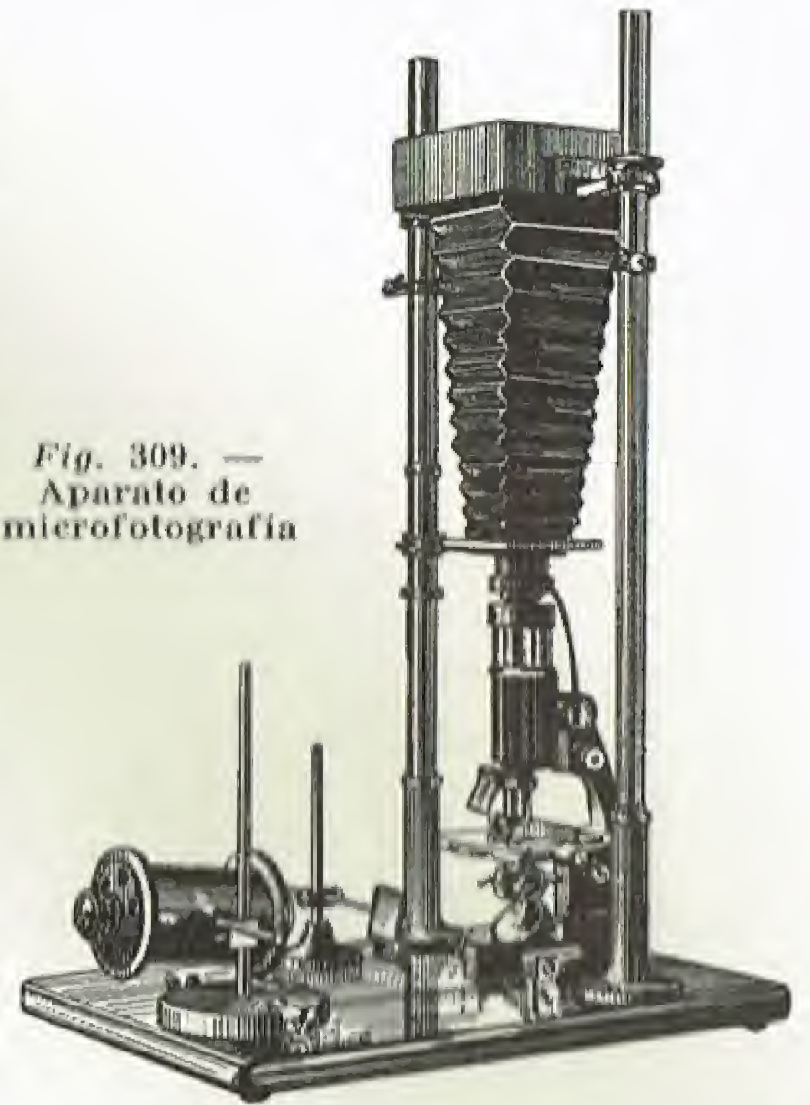


Fig. 309. — Aparato de microfotografía

La imagen, muy aumentada, proporcionada por el microscopio puede fotografiarse. Los rayos luminosos salen del ocular como si procedieran de diferentes puntos de la imagen virtual, que se conduce como un objeto con respecto al objetivo de un aparato fotográfico colocado encima del ocular. Otro dispositivo consiste en utilizar otro ocular, denominado *ocular de proyección*, que da directamente una imagen real que puede recogerse sobre una placa fotografiada. En la figura 309 se ve un aparato de microfotografía con su microscopio.

Anteojos - Gemelos - Telescopios

Anteojo astronómico. Anteojo terrestre. Gemelos de prismas o prismáticos. Anteojo de Galileo. Poder separador. Telescopios

Los instrumentos que vamos a estudiar sirven para examinar objetos distantes, a los cuales no podría aproximarse el observador o el instrumento. No obstante, es necesario que el diámetro aparente bajo el cual se ve la imagen sea notablemente mayor que aquel bajo el cual se ve el objeto a simple vista.

Anteojo astronómico. — El anteojo se compone en principio de dos sistemas convergentes (*fig.* 310). El primero, de gran longitud focal, está dirigido hacia el objeto y se denomina por esta razón *objetivo;* da una imagen real e invertida A'B', situada en su plano focal. El segundo, de pequeña longitud focal, actúa como una lupa y da de esta primera imagen otra segunda, virtual, derecha y muy aumentada A"B"; este segundo sistema convergente se denomina *ocular*. La imagen final es, por consiguiente, virtual e invertida con respecto al objeto. Supongamos el ojo colocado en el foco-imagen F'_2 del ocular, y determinemos qué condición debe satisfacer el ángulo $\widehat{\alpha'}$, diámetro aparente de la imagen, para exceder el diámetro aparente α del objeto observado a simple vista.

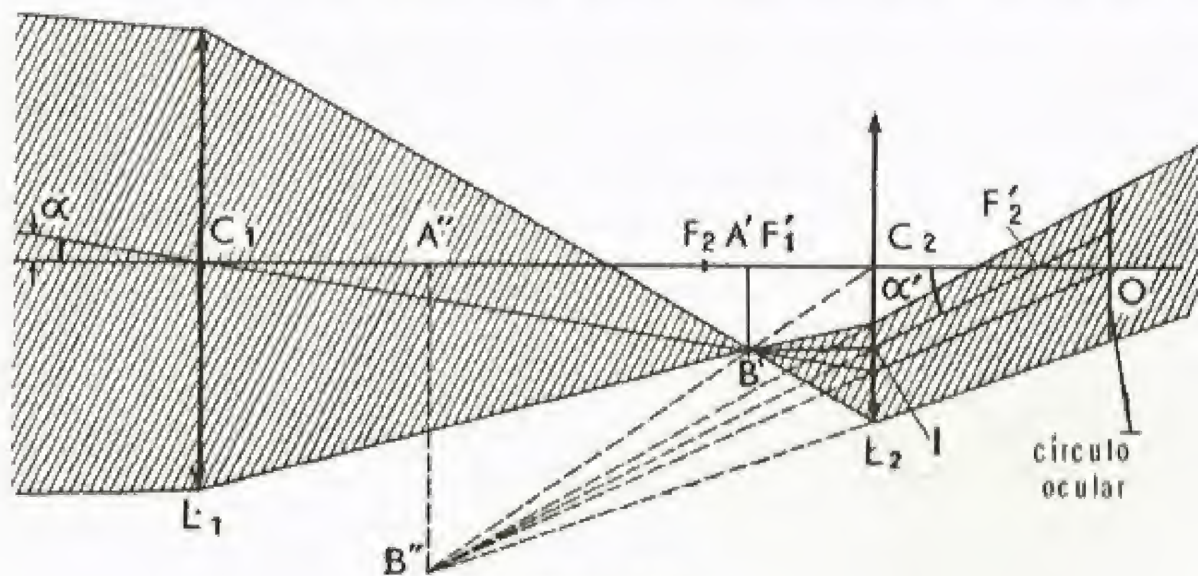


Fig. 310

$\alpha' = \dfrac{C_2I}{C_2F'_2}$ o bien, llamando f_2 a la distancia focal del ocular,

$$\alpha' = \frac{C_2I}{f_2} = \frac{A'B'}{f_2}.$$

Calculemos ahora el ángulo $\widehat{\alpha}$. El objeto, al estar muy alejado, se ve desde F'_2 o desde el centro óptico C_1 del objetivo bajo el mismo ángulo, limitado por una parte por el eje óptico y por la otra por el radio que se refracta según C_1B'; por consiguiente, $\widehat{\alpha} = \widehat{A'C_1B'}$, cuyo valor es $\alpha = \dfrac{A'B'}{C_1F'_1}$, es decir, que si f_1 es la distancia focal del objetivo,

$$\widehat{\alpha} = \frac{A'B'}{f_1}.$$

Se llama aumento G del anteojo el cociente $\dfrac{\alpha'}{\alpha}$, que se calcula fácilmente:

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{A'B'}{f_2} : \frac{A'B'}{f_1} = \frac{f_1}{f_2}.$$

Este cociente es el de las longitudes focales del objetivo y el ocular, y el anteojo será ventajoso para el observador si G es mucho mayor que 1, es decir, si la distancia focal del objetivo es mucho mayor que la del ocular.

No puede definirse la potencia del anteojo, como con la lupa y el microscopio; el objeto AB es siempre muy grande comparado con el ángulo $\widehat{\alpha'}$ bajo el cual se le ve a través del anteojo, y la potencia es infinitamente pequeña.

Para evitar al ojo la fatiga que producirían observaciones prolongadas, puede hacerse el montaje de forma que la imagen virtual se produzca bastante lejos, lo que exige que A'B' esté situado en la proximidad del foco-objeto del ocular, y al coincidir A' con F'_1, resultará que en este caso el foco-imagen del objetivo y el foco-objeto del ocular coincidan; ya hemos estudiado tal sistema, que es afocal.

La puesta a punto del microscopo se efectúa desplazando conjuntamente el objetivo y el ocular, que están fijados al mismo tubo, hacia el objeto. En el anteojo, como el objetivo está orientado hacia el objeto, se desplaza el ocular, que está montado en un tubo provisto de una cremallera y es accionado por un piñón.

Los objetivos del anteojo astronómico están generalmente constituidos por dos lentes que forman una combinación convergente acromática que carece de aberración de esfericidad. La longitud focal puede variar, según los tipos, entre varios decímetros y varios metros. Los oculares son siempre oculares compuestos, o dobletes; oculares de Ramsden, de Kellner, etc. (*fig.* 311).



Fig. 311. — Objetivos y oculares de anteojos: 1. Objetivo convexocóncavo; 2. Objetivo biconvexo; 3. Objetivo planoconvexo

El campo de un anteojo, que es el diámetro aparente máximo del objeto visible en el instrumento, es tanto menor cuanto mayor es el aumento. Como este último puede exceder 100 (ha alcanzado 500), lo que corresponde a un campo de medio grado aproximadamente, sería prácticamente imposible orientar un anteojo hacia el objeto que se quiere enfocar. Entonces se instala sobre el tubo del anteojo otro anteojo mucho más pequeño, de poco aumento y cuyo eje óptico es paralelo al del instrumento mayor (*fig.* 312). Todos los rayos luminosos que

atraviesan el objetivo de un anteojo pasan, después de refractados por el ocular, por la imagen que dicho ocular da del objetivo, imagen muy próxima al foco-imagen F'_2 del ocular. Esta imagen se denomina círculo o anillo ocular, en el cual hay que colocar el ojo para que abarque todo el campo del anteojo. Demuestra la teoría que el aumento sigue siendo igual al cociente entre el diámetro del objetivo y el diámetro del anillo ocular, que puede medirse con una lupa especial denominada *dinámetro de Ramsden*. Éste es un segundo método para determinar el aumento de un anteojo.

Fig. 312.—Anteojo provisto de un buscador

El anteojo no sirve solamente para el examen de objetos muy alejados, los astros por ejemplo, sino que también fija direcciones y, por medio de un círculo graduado, mide ángulos o distancias angulares. Para ello basta con añadir al anteojo una retícula en el plano focal del objetivo, o más exactamente en el plano de la imagen real invertida A'B'. Una *retícula* es un diafragma circular en el cual se han montado dos hilos muy finos en cruz (*fig.* 313). Cuando la imagen del punto se encuentra en el punto de intersección de los hilos de la retícula, este punto se encuentra sobre la prolongación de la recta que une el centro óptico C_1 con el punto de intersección de los hilos. Esta recta, verdadero eje de enfoque del anteojo, es fija con respecto al instrumento. Cuando se enfocan sucesivamente dos puntos, el anteojo se desplaza un ángulo igual al ángulo bajo el cual se ven estos dos puntos (distancia angular de dos estrellas, por ejemplo). Solidaria con el anteojo existe una alidada que se desplaza sobre un círculo graduado y que permite, por consiguiente, medir los ángulos.



Fig. 313

Anteojo terrestre. — El hecho de que las imágenes de los astros sean invertidas no presenta inconveniente alguno, lo que no ocurre al observar los objetos alejados. Entonces hay que añadir al anteojo astronómico un dispositivo óptico que rectifique la imagen, denominado *vehículo*. El modelo más sencillo de vehículo es una lente que, situada a una distancia doble de su longitud focal de la imagen real A'B' (*fig.* 314), da de la misma una imagen real de la misma dimensión A"B", pero enderezada, que el ocular reproduce. De esta forma, hay necesidad de alargar el anteojo cuatro veces la longitud focal del vehículo. Este tipo de vehículo fue preconizado por el astrónomo Kepler, que inventó, al parecer, el anteojo astronómico, hacia 1611. Desde entonces se prefiere utilizar un vehículo compuesto por dos lentes convergentes montadas en el mismo tubo que el ocular ordinario, desplazándose las cuatro lentes unidas para la puesta a punto. La primera lente V_1 del vehículo da de la imagen real A'B' una imagen virtual más alejada y aumentada A"B". Esta imagen está suficientemente alejada de la segunda lente V_2, que da una imagen real invertida, es decir, del mismo sentido que el objeto; esta imagen es la que reproduce, en la misma forma ordinaria, el ocular (*fig.* 315).

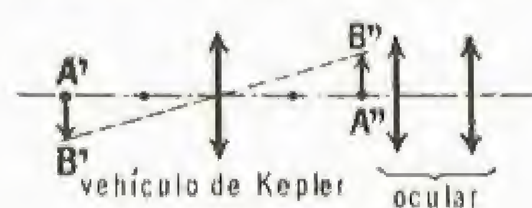


Fig. 314

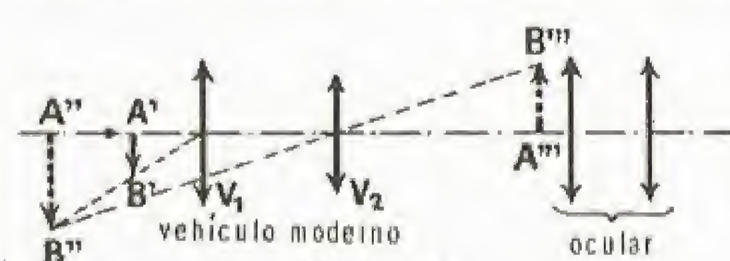


Fig. 315

Gemelos de prismas o prismáticos. — Los anteojos terrestres que acaban de describirse no permiten más que la visión con un solo ojo. Para los aumentos pequeños, hasta 10 ó 12, el anteojo puede mantenerse a mano, pero para aumentos mayores, los menores desplazamientos del anteojo, transmitidos por la mano, hacen que "bailen" las imágenes, lo que impide su examen: entonces es necesario colocar el anteojo sobre un pie o soporte.

Para permitir la visión por ambos ojos, pueden disponerse paralelamente dos anteojos del mismo aumento cuyos ejes tengan la misma distancia que los ojos, pero la longitud y el volumen del instrumento, aumentado por la del vehículo, resulta molesto. En 1850, Porro, oficial de ingenieros, inventó un vehículo rectificador formado por dos primas de reflexión total que no solamente enderezan la imagen mediante cuatro reflexiones (dos bastarían), sino que la acortan, plegando los rayos. Los gemelos de prisma se componen de dos combinaciones idénticas, una de ellas representada en la figura 316; ambos prismas están cruzados. Un anillo con estrías situado entre los dos cuerpos de los gemelos permite ajustar simultáneamente los dos oculares, que son convergentes, como en el anteojo astronómico. El único inconveniente de estos gemelos es su peso, que aumenta a causa de los cuatro prismas de vidrio.

Para aumentar la claridad de estos instrumentos los objetivos, prismas y oculares están provistos de capas antirreflectantes que les dan una apariencia azulada.

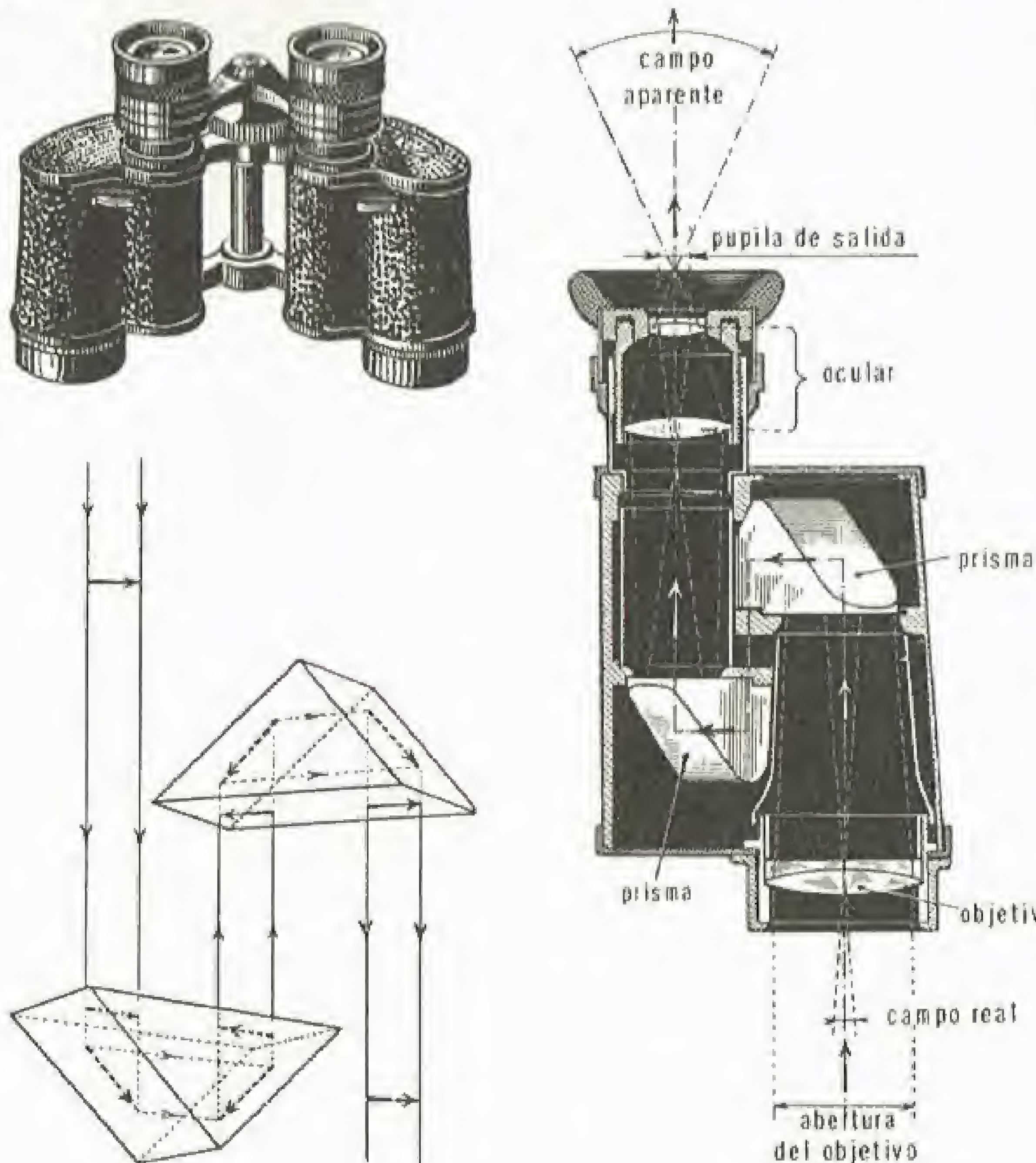


Fig. 316. — GEMELOS PRISMÁTICOS: Vista exterior, sección y camino de los rayos luminosos en los prismas

Anteojo de Galileo. — Es un instrumento óptico análogo al anteojo astronómico, pero que da, sin vehículo, una imagen recta. Se caracteriza por un ocular divergente. Unos atribuyen su invención a Z. Jansen (el inventor del microscopio), hacia 1608, otros a Hans Lippershey. En Francia se denomina este instrumento anteojo de Galileo, porque el sabio italiano construyó en 1610 un anteojo análogo que aumentaba 30 veces, con el que hizo brillantes descubrimientos en astronomía: los satélites de Júpiter, las fases de Venus y de Marte, análogas a las de la Luna, las manchas del Sol, etc.

El objetivo convergente L_1 del anteojo da del objeto una imagen A'B' situada en su plano focal. Esta imagen es interceptada con una lente divergente, de forma que A'B' cae en la proximidad del foco-objeto del ocular divergente, entre una y dos veces su longitud focal. En estas condiciones, es sabido que la lente divergente da una imagen virtual invertida y mucho mayor que el objeto, también virtual. Esta imagen definitiva tiene, por consiguiente, el mismo sentido que el objeto inicial (*fig.* 317).

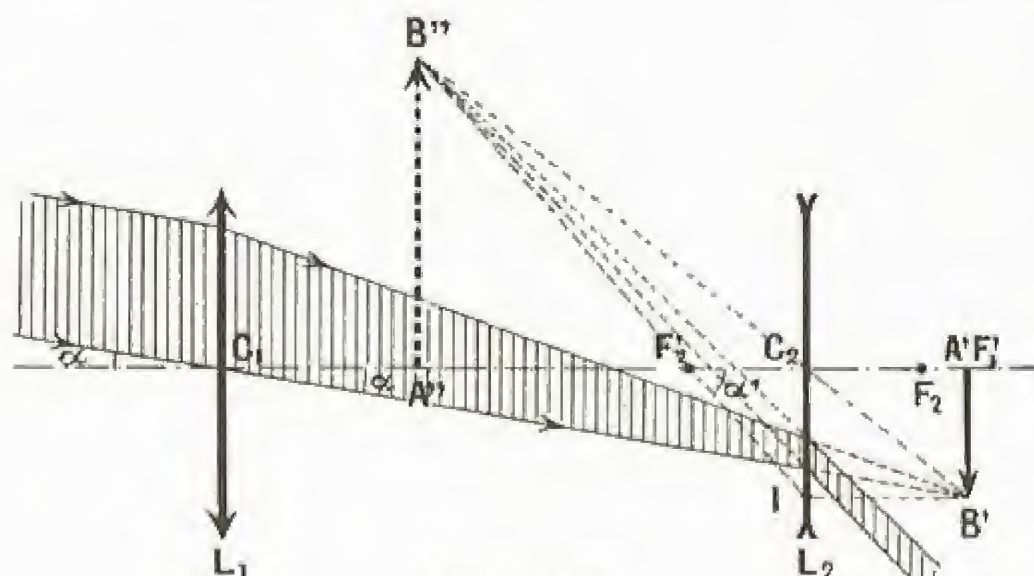


Fig. 317

Un razonamiento análogo al hecho para el anteojo astronómico muestra que el aumento sigue siendo igual al cociente entre la longitud focal f_1 del objetivo y la longitud focal f_2 del ocular: $G = \frac{f_1}{f_2}$. En efecto, la imagen A"B" se encuentra siempre muy alejada del ocular, los focos F'_1 y F_2 coinciden prácticamente y el sistema sigue siendo afocal; entonces, el ángulo $\widehat{\alpha'}$ bajo el cual el ojo, colocado tras el ocular, divisa la imagen, sigue siendo $\widehat{\alpha'}$, de forma que $\widehat{\alpha'} = \frac{C_2I}{C_2F'_2} = \frac{A'B'}{f_2}$, mientras que el diámetro aparente del objetivo sigue siendo $\widehat{\alpha} = \frac{A'B'}{A'C_1} = \frac{A'B'}{f_1}$. Se tendrá por consiguiente, $G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{f_1}{f_2}$.

El sistema de Galileo se presta especialmente a la construcción de gemelos, ya que los tubos son más cortos que los de los anteojos astronómicos, al estar situado el ocular delante del foco del objetivo. Los gemelos

necesitan, para que den buenas imágenes, objetivos y oculares acromáticos separados; su construcción es más sencilla que la de los gemelos prismáticos (*fig.* 318), pero tienen graves defectos. Su campo es mucho menor que el de los anteojos astronómicos o el de los gemelos prismáticos, y sólo puede observarse una porción más pequeña del paisaje. Como la imagen real A'B' queda además suprimida por el ocular divergente, no cabe la posibilidad de disponer en el anteojo de Galileo una retícula o una división cualquiera, de forma que con este instrumento no se puede localizar las direcciones ni medir los ángulos. Añádase finalmente que no es posible construir anteojos de Galileo cuyos aumentos sean tan grandes como los de los anteojos de Keppler.


Fig. 318. — Gemelos ordinarios

Poder separador. — Una característica de los anteojos de la que todavía no se ha tratado es el *poder separador*. Estudiemos primeramente el ojo bajo este aspecto. Para que las imágenes que se forman en la retina de dos puntos den impresiones separadas, es necesario que afecten a fibras nerviosas que no estén próximas, ni adyacentes, sino que estén por lo menos separadas por una tercera fibra. Como las dimensiones de esta fibra son del orden de cinco milésimas de milímetro, el ángulo bajo el cual esta distancia se ve desde el centro óptico del ojo es $\frac{0{,}005}{15}$, ya que la distancia focal del sistema ocular es 15 mm (*fig.* 319).

Este ángulo de $\frac{1}{3\,000}$ de radián o de un minuto de arco representa también el diámetro aparente de los puntos más próximos que el ojo puede separar. Se dice que el poder separador del ojo es de 1′, lo que corresponde a dos puntos que distan $\frac{1}{10}$ de milímetro, vistos a 30 cm, o a puntos separados 3,3 mm, observados a 10 mm.

En los anteojos, el poder separador es el ángulo bajo el cual se ven desde el centro óptico del objetivo los puntos más próximos de la imagen real, y por consiguiente es también el diámetro aparente de los dos puntos más próximos que el objetivo puede separar. Este ángulo es tanto menor cuanto mayor es el diámetro del objetivo, y llega a ser de una fracción de segundo en los objetivos de 20 cm de diámetro. Para que el ojo pueda a su vez distinguir todos los detalles separados en la imagen proporcionada por el objetivo, es necesario que pueda verlos bajo un ángulo igual por lo menos a un minuto; para evitar la fatiga ocular, se toman tres minutos. El aumento mínimo que hay que dar al instrumento será tal que, multiplicado por el poder separador del objetivo, se obtengan tres minutos. Un objetivo de anteojo de 80 mm de diámetro tiene un poder separador de 1″,5; se necesitará, pues, un aumento mínimo de 120 en la práctica, lo que fija la distancia focal del ocular que hay que emplear, dada la longitud focal del objetivo. Así, en el ejemplo escogido, el objetivo tiene una longitud focal de 120 cm, y el ocular correspondiente tendrá por consiguiente una distancia focal de 1 cm.

1′ 5μ 15 mm

Fig. 319

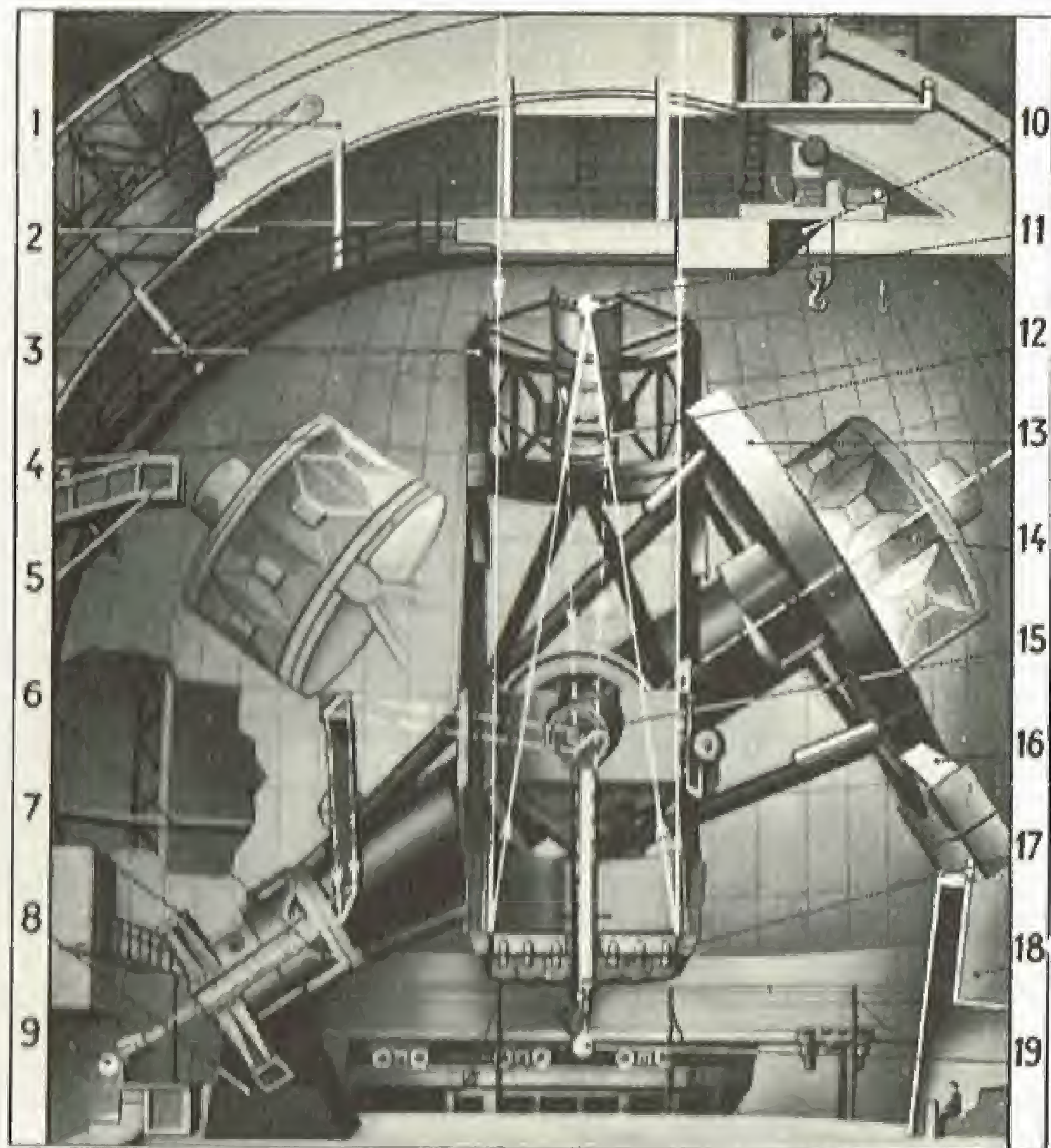
Fig. 320

El poder separador de los anteojos se mide por medio de miras que llevan trazos negros y distantes, dibujados sobre un fondo blanco, y situadas a diez metros (*fig.* 320).

Telescopios. — Es más fácil construir un gran espejo de vidrio que un gran objetivo de anteojo astronómico, ya que no es necesaria la homogeneidad perfecta del vidrio, y por otra parte sólo hay que tallar una superficie en vez de las cuatro que necesitan los objetivos de dos lentes. Se denominan *telescopios* los instrumentos construidos para el examen de los astros, y cuyo objetivo está constituido por espejos cóncavos. Estos espejos, primitivamente esféricos, son actualmente parabólicos, y tienen además la ventaja de carecer de toda aberración cromática.

La figura 321 muestra el dispositivo debido a Newton, en 1668. Un espejo cóncavo da de un astro una imagen en el foco F, y un espejo plano *m* refleja los rayos luminosos del lado del instrumento: antiguamente la imagen real, situada en F′ se observaba a través de un ocular. Foucault reemplazó el espejo *m* por un prisma de reflexión total, y el ocular simple por un ocular de cuatro lentes.

En la misma época, Cassegrain, profesor del Colegio de Chartres, inventó un telescopio más corto y mejor que el de Newton. Un espejo cóncavo da también una imagen real en su plano focal, pero la imagen es interceptada por un pequeño espejo convexo, otras veces esférico, y en la actualidad casi siempre hiperbólico. Este espejo está dispuesto de manera que la imagen interceptada quede comprendida entre su foco y su vértice. En estas condiciones, se forma una imagen real cerca del espejo cóncavo, que tiene un orificio a través del cual se observa la imagen real con un ocular (*fig.* 322). Para no tener necesidad de perforar el espejo cóncavo, pueden enviarse los rayos reflejados por el espejo convexo mediante un espejo plano inclinado 45°.



El mayor telescopio del mundo: el telescopio de Monte Palomar

La figura muestra un corte del telescopio y una parte de la disposición interior de la cúpula bajo la cual está instalado. El Observatorio de Monte Palomar está situado a 2 000 metros de altura, a 56 km del Océano Pacífico. Tres combinaciones de espejos permiten obtener tres distancias focales diferentes, a las que corresponden los tres focos de observación 9, 11 y 19

1. Orificio de observación (abertura, 9 m) de la cúpula (12 m de diámetro, 1 000 t de peso); 2. Camino de rodadura de la grúa (v. 10); 3. Caja del telescopio situada en la parte superior del tubo de 17 metros de longitud y 130 toneladas de peso, que soporta el espejo; 4. Dibujo figurado que muestra cómo el observador sale y entra en la caja del telescopio; es el único aparato donde el observador se coloca en el propio tubo para observar directamente el foco principal; 5. Plataforma de acceso del foco primario, a la que se accede por un ascensor; 6. Descanso sur del eje polar (v. 14); 7. Círculo de arrastre en ascensión recta; 8. Pilar sur; 9. Foco Coudé; distancia focal: 152 m (*f*/30). Es la mayor de las tres distancias focales que pueden obtenerse mediante combinaciones del espejo (v. 11, 12 y 19). La trayectoria de los rayos luminosos se indica en trazo discontinuo; 10. Grúa de 60 toneladas (v. 2); 11. Foco primario; distancia focal: 16,7 m (*f*/33) (v. 9, 12 y 19). La trayectoria de los rayos luminosos se indica en trazo continuo. 12. Espejos convexos utilizados en el caso de observación en los focos Coudé o Cassegrain; 13. Disco en herradura que gira alrededor de su eje, paralelo al de la Tierra, es decir, coincidiendo con el eje polar (v. 14); 14. Eje polar (v. 13); 15. Eje de declinación; 16. Soporte hueco de inyección de aceite. El peso total del instrumento alcanza 450 t y para reducir los rozamientos sobre los cojinetes se les inyecta aceite a una presión tal que todo el instrumento flota en una verdadera capa de aceite; 17. Espejo primario de cinco metros de diámetro, de vidrio Pyrex. En la masa de vidrio se han dispuesto alveolos, sobre la cara dorsal, para disminuir el peso del espejo, que pesa trece toneladas a pesar de ello. Para el montaje Cassegrain (v. 19) se le ha perforado un orificio central de 1 metro de diámetro; 18. Pilar norte; 19. Foco Cassegrain; distancia focal: 81 m (*f*/16) (v. 9, 11, 12 y 17). La trayectoria de los rayos luminosos se indica en trazo discontinuo mixto

Últimamente se han construido telescopios gigantes. En América, el telescopio del observatorio de Monte Wilson tiene un espejo parabólico de 1,52 m de diámetro y de 7,6 m de distancia focal, que pesa 865 kilogramos; otro telescopio, todavía más grande, tiene 2,50 m de diámetro y 12,50 m de longitud focal. El mayor telescopio del mundo en la actualidad es el telescopio Yale de Monte Palomar, cuyo espejo tiene cinco metros de diámetro. Con estos instrumentos de primer orden se han realizado espléndidos trabajos astronómicos.

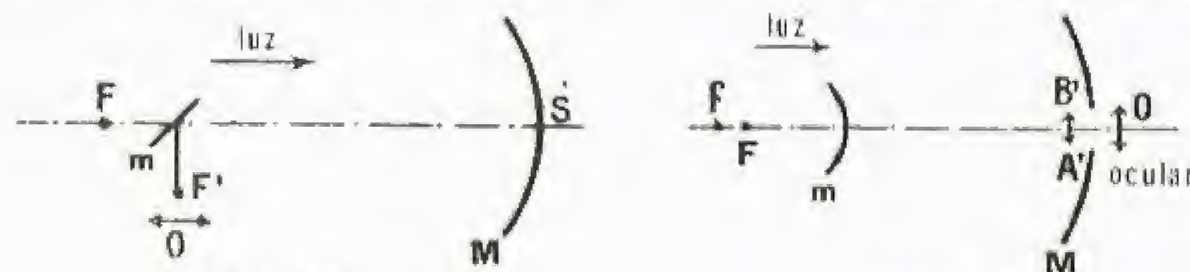


Fig. 321 *Fig.* 322

Fotometría
Goniómetros y refractómetros

Fotometría. — Las diferentes fuentes de luz no tienen todas la misma intensidad; es sabido que una bujía alumbra menos que una lámpara eléctrica. La determinación de la intensidad de una fuente de luz se realiza gracias a la *fotometría.*

Se escogió primeramente como unidad de intensidad luminosa la *bujía internacional,* que corresponde sensiblemente a $\frac{1}{20}$ de la unidad indicada por Violle en 1881, que era la intensidad luminosa irradiada normalmente por un centímetro cuadrado de platino en su punto de fusión, 1773,5° C. Alemania se mantuvo fuera de este convenio internacional, adoptando una unidad menor: la bujía Hefner, que vale 0,9 de bujías internacionales, materializada por la llama de una lámpara de gasolina que quema acetato de amilo; la altura de la llama es de 40 mm.

Desde 1940, la bujía internacional fue reemplazada por una nueva bujía, denominada *candela,* que difiere muy poco de la anterior:

1 candela : 0,98 b. I.

Una superficie de 1 cm^2 del radiador integral (cuerpo negro) a la temperatura de fusión del platino (1773,5° C) irradia normalmente 60 candelas.

Los patrones luminosos modernos son lámparas eléctricas de filamento de carbono o de tungsteno, alimentadas por corriente continua a tensiones bien determinadas.

La intensidad luminosa de una lámpara se mide comparando la iluminación que produce sobre una superficie blanca con la que produce una lámpara de intensidad conocida, una lámpara patrón. Si se examinan dos superficies adyacentes iluminadas cada una exclusivamente por una fuente diferente, podrá observarse que una está más iluminada que la otra, o que las iluminaciones son iguales, pero no será posible decir que una superficie está dos o tres veces más iluminada que la otra. Las medidas fotométricas son, pues, delicadas. Sabiendo que la iluminación o la cantidad de luz recibida por una superficie disminuye al alejarse la fuente, se procede de forma que las dos superficies contiguas estén igualmente iluminadas, alejando o aproximando una de las dos fuentes de luz.

¿Cómo podrá obtenerse el valor de la intensidad luminosa conociendo las distancias? Se consigue aplicando la ley fundamental de la fotometría: *la iluminación de una superficie varía en razón inversa del cuadrado de su distancia a la fuente.* Esta ley se verifica muy sencillamente por la siguiente experiencia: Tomemos como superficies iluminadas las dos caras de un gran prisma de mármol (*fig.* 323); coloquemos en un lado una bujía a un metro y averigüemos cuántas bujías hay que colocar a dos metros, por la otra cara, para obtener iluminaciones iguales: la experiencia nos indica que hay que colocar cuatro bujías. Llamando I y I' a las intensidades luminosas así obtenidas, y d y d' a las distancias, se tendrá,

S d d' S' I I'

Fig. 323

$$\frac{I'}{I} = \frac{d'^2}{d^2}, \text{ puesto que } \frac{I'}{I} = 4 \text{ y } \frac{d'}{d} = 2.$$

Esta relación se escribe en la forma $\frac{I}{d^2} = \frac{I'}{d'^2}$, y permite calcular la intensidad I' cuando se conocen las distancias d y d' y la intensidad de la lámpara patrón. El instrumento formado por las dos superficies de comparación se denomina *fotómetro.* Las dos fuentes que se comparan se desplazan sobre una especie de rieles, denominada "banda óptica".

Las medidas fotométricas son muy delicadas y exigen observadores cuyos ojos estén especialmente ejercitados. El fotómetro puede reemplazarse por una *pila termoeléctrica* conectada a un galvanómetro o a un milivoltímetro muy sensible. Entre la pila y la fuente luminosa se intercala una cubeta que tiene un líquido coloreado que da a la pila la misma sensibilidad espectral que el ojo humano. En estas condiciones, las desviaciones del instrumento de medida son proporcionales a las intensidades luminosas.

También pueden utilizarse *células fotoeléctricas;* las más cómodas son las llamadas células de "capa de detención" (selenio u óxido de cobre), montadas directamente sobre miliamperímetros. Las intensidades eléctricas medidas siguen siendo proporcionales, en ciertas condiciones, a las intensidades luminosas.

El cociente de la intensidad luminosa por el cuadrado de la distancia entre la fuente y la superficie, mide la iluminación de esta superficie. La unidad de iluminación es la que produce una bujía internacional, o una candela, colocada a un metro de distancia de la superficie. Esta unidad se denomina *lux.* Para leer en una mesa sin fatiga es necesaria, por ejemplo, una iluminación mínima de 20 a 25 lux. En una sala bien iluminada, en pleno día, la iluminación alcanza 100 lux, mientras que en pleno sol, un día de verano, la iluminación puede llegar a 100 000 lux.

Suele también considerarse, además de las magnitudes fotométricas de intensidad e iluminación, el flujo luminoso, que es la cantidad de luz irradiada en el espacio.

Supongamos una esfera de radio R, en cuyo centro se ha colocado una fuente luminosa de intensidad I; cada punto de la esfera recibirá una iluminación $\frac{I}{R^2}$; la cantidad total de luz irradiada por la fuente es el producto de la iluminación por la superficie de la esfera $4\pi R^2$, y el flujo F será, pues, $\frac{I}{R^2} \times 4\pi R^2$, o sea $4\pi I$. La unidad de flujo, por tanto, será la cantidad de luz que recibe una superficie de un metro cuadrado iluminada por un lux. Esta nueva unidad se denomina *lumen.* Una lámpara eléctrica de 50 bujías irradia un flujo total luminoso que sería $4\pi \cdot 50$ si la lámpara tuviera la misma intensidad en todas las direcciones; de hecho, este flujo es solamente $10 \times 50 = 500$ lúmenes, efectuándose el máximo de emisión horizontal (esta intensidad horizontal es la que indican los fabricantes). Para hacer fotografías a la luz artificial se emplean de 12 000 a 60 000 lúmenes; la intensidad horizontal de estas lámparas es aproximadamente de 1 200 a 1 600 bujías.

El ojo es extremadamente sensible y puede soportar iluminaciones de valores tan extremos como 100 000 lux en pleno sol, 0,2 lux con luna llena y $\frac{1}{3\,000}$ de lux en una noche sin luna. Se calcula que el ojo, bien protegido de las luces parásitas, podría distinguir una simple bujía colocada a 27 km.

Goniómetros. — Llámanse así los instrumentos que sirven para medir los ángulos. Se componen fundamentalmente de un círculo graduado en el centro del cual hay una platina sobre la que se coloca el prisma cuyos ángulos quieren medirse. Alrededor del eje del círculo puede girar un anteojo astronómico solidario de una alidada que permite determinar las posiciones. El sistema está iluminado por un *colimador,* también móvil alrededor del centro del círculo. Este colimador está formado por una rendija vertical fina colocada en el foco de una lente convergente, y envía un haz de rayos paralelos que se reflejan en las caras del prisma.

Para medir un ángulo se ilumina la arista por el colimador (*fig.* 324); los rayos se reflejan en dos haces que se recogen sucesivamente en el anteojo, en el cual se percibe una imagen neta de la rendija del colimador. En efecto, los rayos reflejados son paralelos y convergen en el foco del objetivo del anteojo, formando una imagen de la rendija que es aumentada por el ocular. Si A es el ángulo del prisma, se demuestra fácilmente que el anteojo ha girado un ángulo 2A, al pasar de la posición 1 a la posición 2. Si se mide la desviación mínima D que sufre un rayo refractado por un prisma de ángulo A, puede calcularse el índice de refracción por la fórmula

$$n = \frac{\operatorname{sen} \frac{A + D}{2}}{\operatorname{sen} \frac{A}{2}}.$$

El colimador puede iluminarse por radiaciones monocromáticas, de manera que el goniómetro permite medir la dispersión de los vidrios y de los sólidos transparentes, es decir, los índices de refracción que corresponden a los diversos colores simples del espectro.

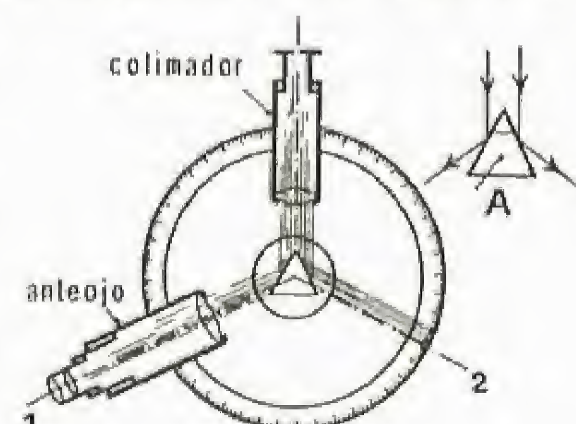


Fig. 324

Para medir el índice de los líquidos, se colocan éstos en recipientes prismáticos.

A fin de obtener más rápidamente los índices de los líquidos, se han concebido instrumentos especiales, denominados *refractómetros,* que llevan cubetas prismáticas de líquidos y sistemas compensadores. Estos instrumentos están graduados en índices, de la misma forma que los termómetros están graduados en grados.

Velocidad de la luz

Determinación mediante observaciones astronómicas. — La primera determinación aproximada de velocidad de la luz data de fines del siglo XII, y fue efectuada, en 1676, por el astrónomo danés **Olaf Roemer,** que trabajaba entonces con Cassini en el Observatorio de París. Hizo este descubrimiento obervando el eclipse de los satélites de Júpiter (*fig.* 325).

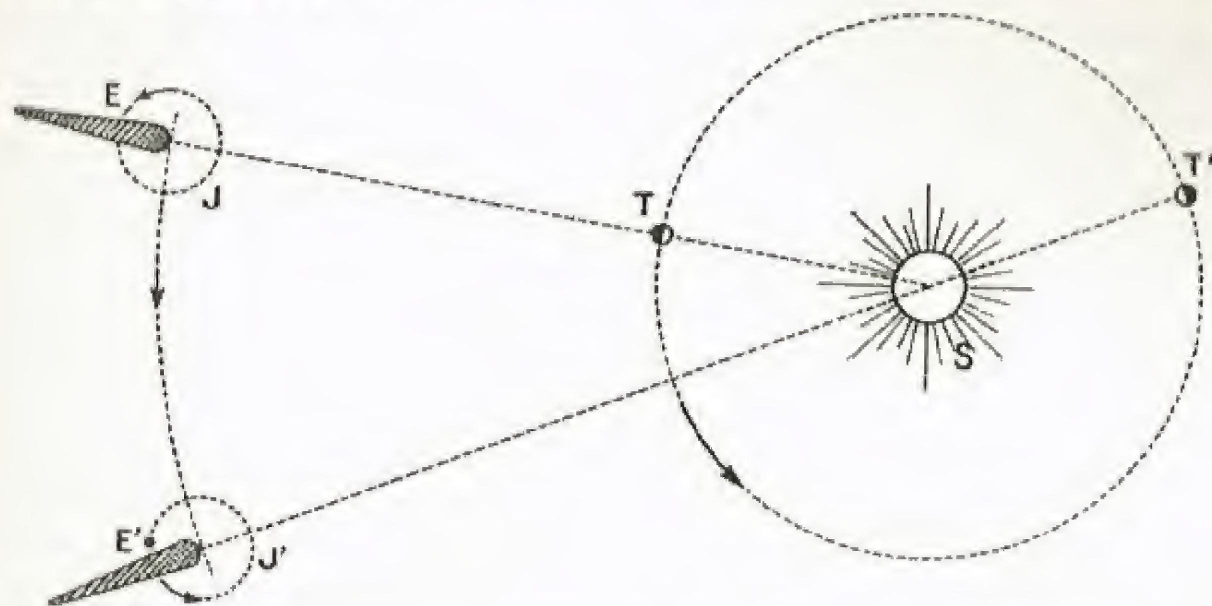


Fig. 325. — Observación de los satélites de Júpiter

Como se sabe, el primer satélite de Júpiter penetra en la sombra proyectada por el planeta a intervalos de tiempo iguales: t = 42 h 28 m 36 s. Supongamos que se observa el instante E de una primera inmersión, cuando Júpiter está en J y la Tierra en T. Después, una segunda inmersión cuando estos astros están respectivamente en J′ y T′, es decir, cuando la distancia de la Tierra a Júpiter ha aumentado todo el diámetro de la órbita terrestre. El tiempo transcurrido entre las dos observaciones es

$$T = nt + \theta,$$

en donde n es el número de eclipses que se han producido durante el desplazamiento TT″ de la Tierra. (θ corresponde al tiempo que ha tardado la luz en recorrer el diámetro D de la órbita terrestre.) La velocidad de la luz será, pues,

$$c = \frac{D}{\theta}.$$

Roemer encontró que θ = 1002 s, lo que da para la velocidad de la luz en el vacío

$$c = 298\,800 \text{ km/s}.$$

Bradley confirmó este valor en 1828 gracias al fenómeno de "aberración de las estrellas fijas": las estrellas parecen describir en un movimiento anual una elipse cuyo diámetro aparente del eje menor es igual, según la teoría, al cociente entre la velocidad de la tierra y la velocidad de la luz. Bradley halló c = 298 500 km/s.

En el siglo XIX, Fizeau y luego Foucault idearon aparatos para medir la velocidad de la luz en el aire. Para deducir después la velocidad de la luz en el vacío, hay que multiplicar el resultado obtenido por el índice de refracción, del aire que es aproximadamente de 1,0003, es decir, aumentarla aproximadamente 85 km/s.

Método de la rueda dentada. — En este método, utilizado por primera vez por Fizeau en 1849, el tiempo t que tarda la luz en ir de una fuente luminosa a un espejo alejado varios kilómetros y volver a la misma fuente S se mide por el tiempo t' que tarda una rueda dentada en avanzar medio diente. Cuando estos tiempos son iguales, siempre que los entrantes y los dientes de la rueda tengan la misma anchura, todo rayo transmitido a la ida por un entrante encuentra al regresar un diente y no se percibe imagen de retorno. Cuando t' es mayor o menor que t, reaparece el haz de retorno. La velocidad de la rueda dentada se regula de forma que se tenga un eclipse completo, y se mide esta velocidad de rotación. Si la rueda gira N revoluciones por segundo y tiene p dientes, se tendrá

$$t' = \frac{1}{2\,Np}.$$

Si la distancia entre la fuente luminosa y el espejo es D: $t = \frac{2D}{V}$.

En el eclipse se tendrá $\frac{2D}{V} = \frac{1}{2Np}$, $V = 4NpD$.

Es posible aumentar la velocidad N y observar un eclipse de orden k que corresponde al paso de $k - \frac{1}{2}$ dientes entre la ida y la vuelta de la luz. Entonces se tendrá

$$V = \frac{4\,NpD}{2k - 1}.$$

La observación del eclipse es entonces más precisa, ya que se necesitará una variación relativa mayor de la velocidad para que reaparezca el haz de retorno.

Como la distancia D debe ser muy grande, el haz de retorno es pequeño. Debe utilizarse una fuente muy intensa (imagen del sol, arco eléctrico). Para evitar al máximo las pérdidas de flujo luminoso entre la ida y la vuelta, Cornu imaginó hacer que el haz fuera paralelo entre la fuente y el espejo, por medio de dos lentes (*fig.* 326).

Los resultados encontrados fueron

1849, Fizeau	(D = 8 633 m)	V = 315 000 km/s;
1876, Cornu	(D = 23 km)	V = 300 400 km/s;
1902, Perrotin	(D = 46 km k = 32)	V = 299 880 km/s.

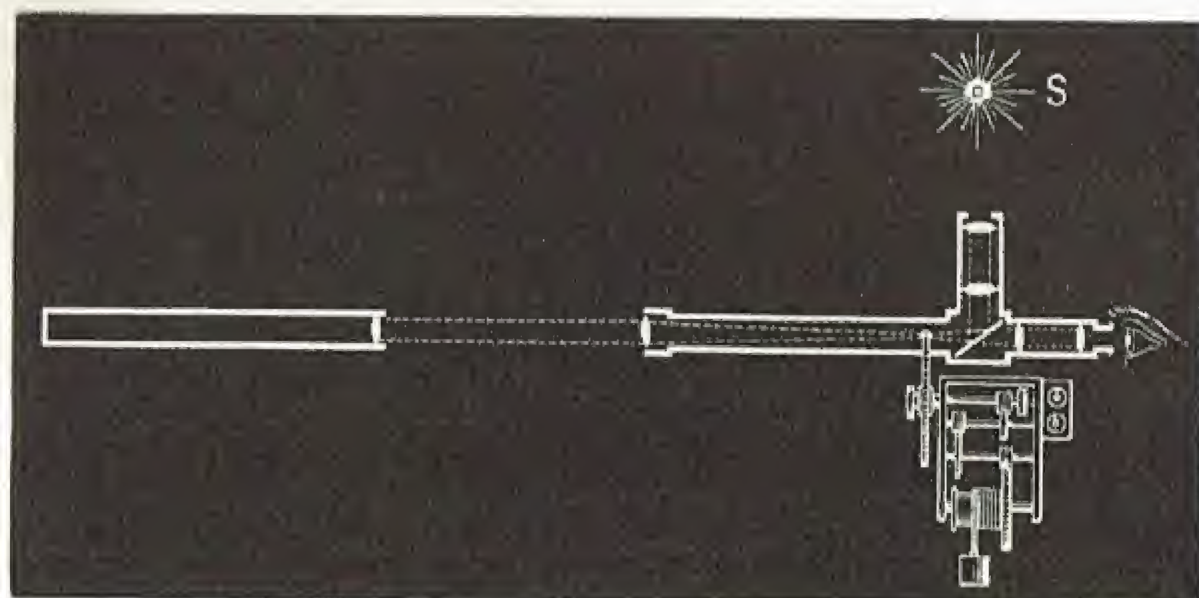


Fig. 326. — Dispositivo del método de la rueda dentada

Método del espejo rotatorio. — En este método, utilizado por primera vez por Foucault en 1862, la luz emitida por una rendija S es reflejada por un espejo rotatorio T, dispuesto en el centro de un espejo cóncavo M. Una lente L da una imagen S_1 de la fuente S, que el espejo T envía a M. Cuando la luz reflejada a la ida por el espejo T vuelve sobre éste después de haber recorrido la distancia 2 TM = 2 D, al cabo de un tiempo $t = \frac{2\,D}{V}$, si V es la velocidad de la luz, el espejo habrá girado cierto ángulo α, y proporcionará una imagen S_2 de S′, tal que el ángulo $\widehat{S_1TS_2} = 2\alpha = \beta$.

Si el espejo T gira con movimiento uniforme, α es constante y S_2 permanece fija mientras que S′ describe el espejo M. Después de pasar por la lente L, los rayos luminosos forman una imagen S″ de la rendija S, distinta de ésta. Foucault la enviaba a un lado gracias a un espejo no plateado G y medía la distancia AB = SS″ con un ocular micrométrico L′ (*fig.* 327).

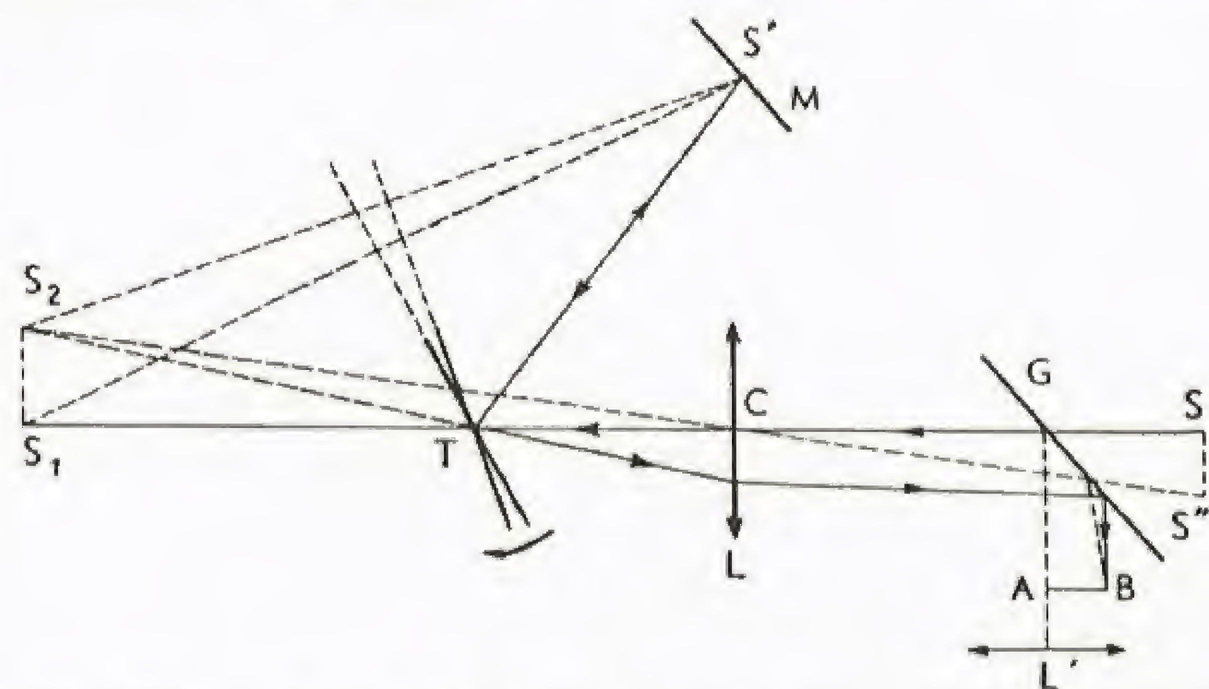


Fig. 327. — Método de Foucault para medir la velocidad de la luz

La distancia D es muy grande con respecto a LT; LL′ forma un anteojo que mide el ángulo $2\alpha = \beta$, bajo el cual se ven dos puntos alejados S_1 S_2 del centro óptico C por su objetivo L. Si el espejo T da n vueltas por segundo, gira $\alpha = 2\pi nt$ durante el tiempo $t = \frac{2D}{V}$.

$$\alpha = 2\pi n\,\frac{2\,D}{V}, \qquad \beta = 8\pi n\,\frac{D}{V},$$

$$V = \frac{8\pi nD}{\beta}.$$

En la experiencia de Foucault, n = 800, D = 20 m, β = 4′8″,
V = 298 000 km/s.

El método fue nuevamente adoptado por Newcomb, y después por Michelson, con algunas modificaciones. Los resultados que encontraron fueron:

1882, Newcomb	(D = 3 700 m)	V = 299 860 km/s;
1926, Michelson	(D = 35 000 m)	V = 299 796 km/s.

Este último método es el que hasta ahora ha proporcionado los resultados más concordantes y, por consiguiente, más seguros. No existen al parecer razones serias para dudar del valor de estos resultados. Por consiguiente, se admite como velocidad de la luz en el vacío
c = 299 800 km/s. con un error inferior a 1/10 000.

Alain TOUREN

Elementos de óptica física

Reseña histórica. Resumen de las leyes de la propagación rectilínea de la luz. Experiencia de los «orificios de Young». Producción de franjas de interferencia. Medida de una longitud de onda. Desplazamiento del sistema de franjas. Otros dispositivos de obtención de franjas de interferencia. Biprisma. Espejos de Fresnel. Anillos de Newton. Láminas semiplateadas. Longitudes de onda de las radiaciones luminosas. Éter luminoso. Vibraciones electromagnéticas. Difracción. Experiencia de difracción. Retículo

Reseña histórica. — **Demócrito**, **Epicuro** y **Lucrecio** consideraban que la luz consistía en corpúsculos muy tenues lanzados por los cuerpos luminosos. Este tipo de ideas permaneció durante mucho tiempo sin evolucionar. En el siglo XVII, **Gassendi** desarrolló el sistema de Demócrito, mientras que **Descartes** admitía la hipótesis de moléculas contiguas que llenaban el espacio y que eran lanzadas por los cuerpos luminosos, transmitiendo su impulso inmediatamente y en todos los sentidos.

Newton desarrolló el *sistema de la emisión*, que es el de los sabios antiguos, y que explica todos los hechos conocidos en su época. Este sistema supone que los cuerpos luminosos lanzan en todas direcciones, y con una rapidez enorme, corpúsculos de una naturaleza especial, carentes de peso y de masa insensible.

Al descubrirse ciertos hechos que esta teoría de la emisión no conseguía explicar, *Malebranche* (1638-1715) y después *Huygens* concibieron el sistema de las ondulaciones: según este sistema, las moléculas de los cuerpos luminosos están animadas de movimientos vibratorios muy rápidos que se transmiten, como el sonido en el aire, a través del éter (medio hipotético perfectamente elástico que llena todos los cuerpos); cada vibración produce una onda comparable a las ondas sonoras o a la que se produce al arrojar una piedra al agua. Este sistema, combatido por Newton, fue defendido por *Euler* y *Young*. La teoría ondulatoria permite prever las interferencias y explica fácilmente los fenómenos de difracción. Los notables trabajos de **Fresnel** asestaron un terrible golpe a la teoría de la emisión.

A fin de decidir cuál de ambas se ajustaba más a la realidad, se observó que la teoría de la emisión conducía a admitir que la velocidad de la luz es menor en el aire que en el agua, mientras que la teoría ondulatoria llevaba a la conclusión contraria.

Foucault midió ambas velocidades y dio la razón a la teoría ondulatoria.

Maxwell (1869) asestó el último golpe a los partidarios de la teoría corpuscular al establecer la correlación entre la luz y los fenómenos electromagnéticos y al prever las ondas electromagnéticas que Hertz descubrió en 1887; no obstante, **Hallwachs** descubrió al año siguiente que un cuerpo cargado negativamente se descarga al exponerse a la luz ultravioleta.

Elster y **Geitel**, en 1889, volvieron a encontrar la misma propiedad para los metales alcalinos, que se denominó *efecto fotoeléctrico*, y que consiste en una emisión de electrones, como demostraron **Lenard** (nacido en 1862) y **Cooper-Hewitt**, en 1900.

La emisión fotoeléctrica sólo depende de la frecuencia de la luz excitadora, sin que intervenga en absoluto su intensidad. Esta característica es difícilmente explicable por la teoría ondulatoria de la luz, y su estudio condujo a **Einstein**, en 1905, a suponer que la luz consiste en partículas elementales, especies de átomos de luz que se denominan fotones. Con ello se reanudó la vieja polémica entre los partidarios de la teoría ondulatoria y los de la teoría corpuscular.

Las dos tendencias seguidas por los físicos se revelaban, no obstante, muy fructuosas: la teoría ondulatoria, que implicaba la idea de una energía radiante, dominaba todo el electromagnetismo, la propagación de las ondas hertzianas, los rayos X, etc.; la teoría electrónica de la materia permitía adoptar de nuevo la teoría de la emisión; se efectuaba, además, un intercambio constante de energía entre ondas y electrones, que desde ese momento no parecían ser esencialmente diferentes.

Louis de Broglie (nacido en 1892) consiguió conciliar ambas teorías en la que él denominó *mecánica ondulatoria*: el electrón tiene propiedades ondulatorias y arrastra en su movimiento un haz de ondas que tienen una misma longitud, una misma velocidad de conjunto, pero velocidades respectivas diferentes de la velocidad de la luz.

Resumen de las leyes de la propagación rectilínea de la luz. — Numerosas experiencias han determinado la aceptación de la hipótesis de que la luz se propaga en línea recta en un medio homogéneo.

Para poner de manifiesto este hecho, se utiliza, por ejemplo, una fuente luminosa de pequeñas dimensiones con respecto a las distancias a las cuales se observan los fenómenos luminosos que produce; esta fuente es lo que se denomina una fuente "puntual", y se comprueba que los fenómenos se desarrollan como si la luz se propagara, a partir de la fuente puntual, siguiendo la dirección de hilos tensos (rayos luminosos).



Fig. 328

Para obtener una fuente puntual, se cubre una fuente de luz con una pantalla opaca E, en la que se ha hecho un pequeño orificio circular S; si se coloca, a una distancia D_1, bastante grande con respecto al radio del orificio S, otra pantalla E_1 que también tiene una abertura O_1 se comprueba que más allá de E_1 sólo hay luz en el cono de vértice S limitado por la abertura O_1; en particular, si se coloca una pantalla en E_2, sólo parece (a primera vista) iluminada, desde esta pantalla, la región delimitada por el cono luminoso (*fig.* 328).

Si se admite como primera aproximación, esta ley de la propagación rectilínea de la luz permite explicar numerosos fenómenos, y en ella se basa la denominada "óptica geométrica".

En realidad, esta ley no debe considerarse más que como una primera aproximación, ya que es incapaz de explicar ciertos fenómenos luminosos, tales como los que vamos a describir a continuación.

Experiencia de los «orificios de Young». — Consideremos, como antes, una fuente limitada por un pequeño orificio S, y coloquemos a una distancia D_1, suficientemente grande con respecto a las dimensiones del orificio, una pantalla E_1 que tiene también dos pequeños orificios O_1 y O_2 muy próximos. Si la luz se propagara rigurosamente en línea recta, debería observarse sobre la pantalla E_2 dos manchas circulares luminosas muy diferentes, de centros O_1 y O_2; lo que se ve en realidad es una serie de líneas paralelas, alternativamente brillantes y obscuras, dispuestas a ambas partes de una línea brillante central perpendicular al plano SO_1O_2; estas líneas se denominan *franjas* (*fig.* 329).

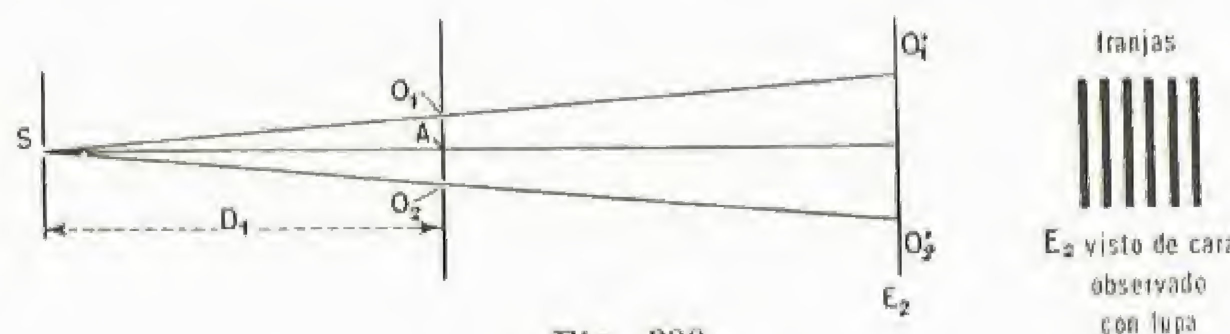


Fig. 329

La existencia de estas franjas brillantes en la región de sombra geométrica de la pantalla E_1 es incompatible con una ley rigurosa de propagación rectilínea de la luz.

Para explicar éstos y otros fenómenos análogos, se han emitido las siguientes hipótesis:

1º Una fuente de luz monocromática produce un fenómeno vibratorio cuyo período y, por consiguiente, la frecuencia caracterizan el color de la luz. Este fenómeno vibratorio se propaga en un medio homogéneo con una velocidad independiente de la dirección. La velocidad de propagación es la misma en el vacío y, prácticamente, también en el aire (300 000 km/s) para todas las radiaciones, cualesquiera que sean sus frecuencias y, por lo tanto, sus colores;

2º Cualquier punto del medio por el cual se propaga el fenómeno vibratorio puede considerarse como una fuente de vibración del mismo período que el de la fuente, pero que presenta con ella una diferencia de fase que depende de su posición mutua.

Este último enunciado constituye lo que se denomina *principio de Huygens*, y se denomina *óptica física* el estudio de los fenómenos que se explican por la teoría vibratoria de la luz.

Producción de franjas de interferencia. — Basándonos en estos enunciados, consideremos, en la experiencia de los orificios de Young, la fuente luminosa S como origen de un fenómeno vibratorio, y los puntos O_1 y O_2 como dos fuentes del mismo período que están además en fase, si, como supondremos primeramente, equidistan rigurosamente de S. Habrá que encontrar cuál será la distribución de la luz en los diferentes puntos del espacio y, en particular, sobre la pantalla E_2 en un lugar cercano al punto C.

Este problema ya se ha considerado al estudiar la composición de las vibraciones que producen dos fuentes del mismo período y en fase.

Se trata evidentemente de un fenómeno de revolución alrededor del eje O_1O_2, por lo cual bastará estudiarlo en un plano meridiano, es decir, en un plano que pasa por O_1O_2. Ya se vio que en cada instante hay concordancia de fase y, por consiguiente, un máximo de amplitud sobre la recta AC y sobre las hipérbolas de focos O_1 y O_2, que son los lugares geométricos de los puntos M cuya diferencia de distancias $MO_1 - MO_2$ es igual a un número entero de longitudes de onda; designemos por (H_1) esta familia de hipérbolas.

Hay en cambio interferencia completa y, por consiguiente, amplitudes nulas, es decir, obscuridad, en todos los puntos en que dicha diferencia de distancias es igual a un número impar de semilongitudes de onda; sea (H_2) esta familia de hipérbolas.

En el espacio, se producirá un máximo de luz en el plano P, trazado por A perpendicularmente a O_1O_2 (plano que contiene AC), y en los hiperboloides engendrados por la rotación de las hipérbolas de la familia (H_1) alrededor del eje O_1O_2; la pantalla E corta el plano P según la recta perpendicular en C a $O'_1O'_2$, que será muy luminosa y que constituirá la franja central; esta recta corta los hiperboloides de la familia (H_1) según hipérbolas cuyo eje es $O'_1O'_2$. En la proximidad de los vértices, los arcos de las hipérbolas son perpendiculares al eje y ofrecen el aspecto de pequeños segmentos de recta perpendiculares al eje y, por consiguiente, paralelos a la franja central, lo que explica las franjas brillantes sucesivas.

Las franjas obscuras están análogamente constituidas por la intersección de los hiperboloides de la familia (H_2) con el plano de la pantalla; sobre estos hiperboloides, la interferencia es completa.

Tratemos de determinar con más precisión las posiciones de las franjas sucesivas.

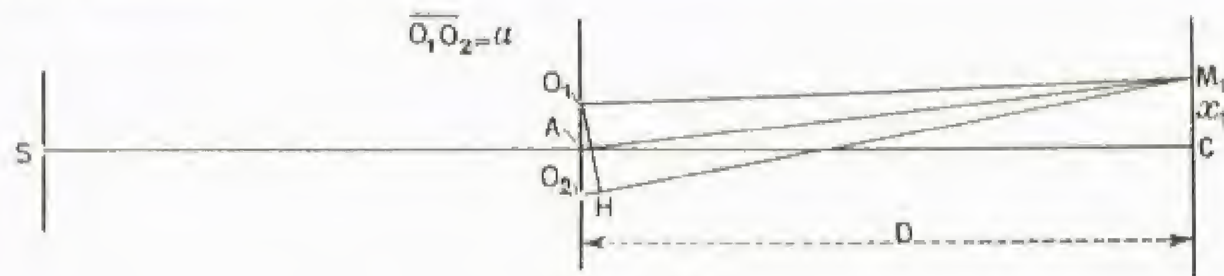


Fig. 330

Sea (*fig.* 330) x_1 la distancia CM_1 a la franja central C del primer máximo de luz; en los triángulos semejantes O_1HO_2 y ACM_1 se tendrá:

$$\frac{x_1}{O_2H} = \frac{AM_1}{O_1O_2}; \text{ sea } O_1O_2 = a; \ O_2H = O_2M_1 - O_1M_1 = \lambda;$$

$$AM_1 = AC$$

sensiblemente, de donde $x_1 = \lambda \dfrac{D}{a}$.

Para el primer mínimo se tendrá, análogamente, $O_2H = \dfrac{\lambda}{2}$, de donde $\varphi_1 = \dfrac{\lambda}{2} \cdot \dfrac{D}{a} = \dfrac{x_1}{2}$; es decir, que el primer mínimo está situado a la misma distancia de la franja central y del primer máximo siguiente.

De manera más general, si un máximo se encuentra a una distancia x, tal como

$$O_2M' - O_1M' = n\lambda, \text{ se obtiene: } x = n\lambda \frac{D}{a};$$

el máximo siguiente se encontrará a una distancia x' tal como

$$O_2M' - O_1M' = (n + 1)\ \lambda, \text{ de donde } x' = (n + 1)\ \lambda \frac{D}{a};$$

la distancia entre los dos máximos sucesivos será, pues,

$$x' - x = \frac{D}{a}\ \lambda,$$

de donde resulta que los máximos sucesivos son equidistantes. Su distancia, denominada "interfranja", es $e = \lambda \dfrac{D}{a}$.

Lo mismo ocurre con los mínimos sucesivos.

Observación. Las longitudes de onda de las vibraciones luminosas son muy pequeñas, del orden de la micra; para que las interfranjas tengan una longitud de onda que pueda observarse a simple vista, o incluso con una lupa de mucho aumento, será necesario que $\dfrac{D}{a}$ sea grande, del orden de 1 000; se toma, por ejemplo, $a = \dfrac{1}{2}$ mm y D = 1 m. Estos valores justifican las aproximaciones hechas en el cálculo, en el que se ha confundido AM_1 con AC, y el pie H de la perpendicular trazada desde O_1 a O_2M_1 con el punto de encuentro de O_2M_1 y de la circunferencia de centro M_1 y del radio M_1O_1.

Medida de una longitud de onda. — Esta experiencia permite determinar la longitud de onda de la luz; para ello, se medirá, valiéndose de un visor con ocular micrométrico (contador de franjas), la longitud correspondiente a un número determinado de interfranjas, la distancia a entre los dos orificios y la distancia D a la pantalla; sea, por ejemplo, D = 1 000 mm, a = 1/2 mm, y supongamos que se haya obtenido 6 mm para la longitud de 5 interfranjas; la relación $e = \dfrac{D}{a}\ \lambda$ da $\lambda = \dfrac{a}{D}\ e$, de donde, en el caso considerado:

$$\lambda = \frac{6}{5} \cdot \frac{0{,}5}{1000} = 0{,}6.10^{-3} \text{ mm o } 0{,}6 \text{ micras},$$

que es sensiblemente la longitud de onda de la radiación amarilla del vapor de sodio incandescente.

Desplazamiento del sistema de franjas. — Supongamos que la fuente no se encuentre exactamente en S sobre la perpendicular en el punto medio O_1O_2; entonces ya no estarán en fase las dos fuentes O_1 y O_2, y como muestra la figura 331, O_1 estará en retraso de fase con respecto a O_2, retraso que corresponde a una diferencia de trayecto O_1H_1 que puede calcularse como se hizo anteriormente para la diferencia de trayecto O_2H; se obtiene $O_1H_1 = \sigma \dfrac{a}{D_1}$; si denominamos ahora "franja central" la franja para la cual la diferencia de trayecto es nula, el punto C' donde se encontrará esta franja será tal como $O_1H_1 = O_2H$ o $\dfrac{\sigma a}{D_1} \cdot x' = \dfrac{\sigma}{D}$, de donde $\dfrac{x'}{\sigma} = \dfrac{D}{D_1}$, lo que exige que los tres puntos S', A y C' estén en línea recta.

Alrededor del punto C' se forma un sistema de franjas que tienen la misma interfranja que el sistema de centro C, y sucede como si el primer sistema se hubiera trasladado a una distancia CC'.

Observación. Cabe preguntarse si no se obtendría un sistema de franjas colocando directamente la pantalla E_1 ante una fuente, lo que equivaldría a iluminar los dos orificios O_1 y O_2 por dos puntos distantes de esta fuente.

Muestra la experiencia que en este caso no se observa sistema alguno de franjas, resultado que se explica si se observa que la emisión de luz en un punto de una fuente es un fenómeno atómico que, incluso durante un tiempo muy corto, afecta a un gran número de átomos diferentes, de forma que se produce un gran número de variaciones bruscas de fase, en el transcurso del tiempo, en la emisión de la luz en cada punto de la fuente. Si se iluminan, por consiguiente, los dos orificios O_1 y O_2 por dos puntos diferentes de la fuente, las vibraciones en O_1

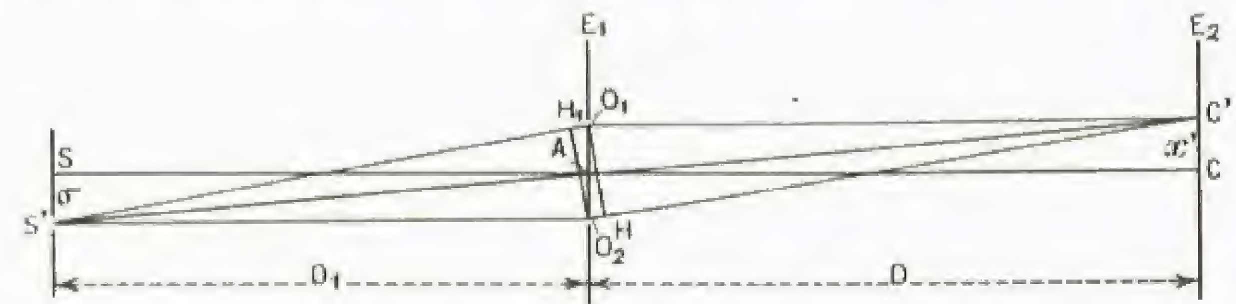


Fig. 331

y O_2 estarán constantemente desfasadas, y presentarán entre sí una diferencia de fase que variará de un instante a otro. En estas condiciones, no podrá producirse ningún fenómeno duradero de interferencia; al contrario, si se iluminan ambos orificios por el mismo punto de la fuente, constituirán dos fuentes que presenten entre sí una diferencia de fase constante.

Observación. Muestra la experiencia que utilizando una rendija fina S y dos rendijas finas O_1 y O_2 paralelas a S las franjas obtenidas son paralelas a las rendijas.

Por consiguiente, admitiremos que la teoría de las ondas y el principio de Huygens permiten explicar este resultado.

Otros dispositivos de obtención de franjas de interferencia. — Se han ideado numerosos dispositivos para obtener las franjas; todos ellos pueden reducirse al dispositivo de los orificios o de las rendijas de Young. En ellos se trata de obtener, a partir de un punto luminoso S, dos fuentes próximas O_1 y O_2 que presenten entre sí una diferencia de fase constante y cuyas vibraciones interfieran en una región determinada del espacio.

Biprisma. — Uno de estos dispositivos se denomina "biprisma". Sean dos prismas (de índice n y ángulo menor $\widehat{A}$) unidos por sus bases; un haz estrecho procedente de una fuente S incide casi perpendicularmente sobre la cara común A_1A_2; este haz es desviado por cada prisma hacia la base: $D = (n - 1)\ \widehat{A}$; después de haber atravesado los prismas, los rayos parecen proceder respectivamente de dos puntos O_1 y O_2, que van a desempeñar la función de los orificios de Young; en la

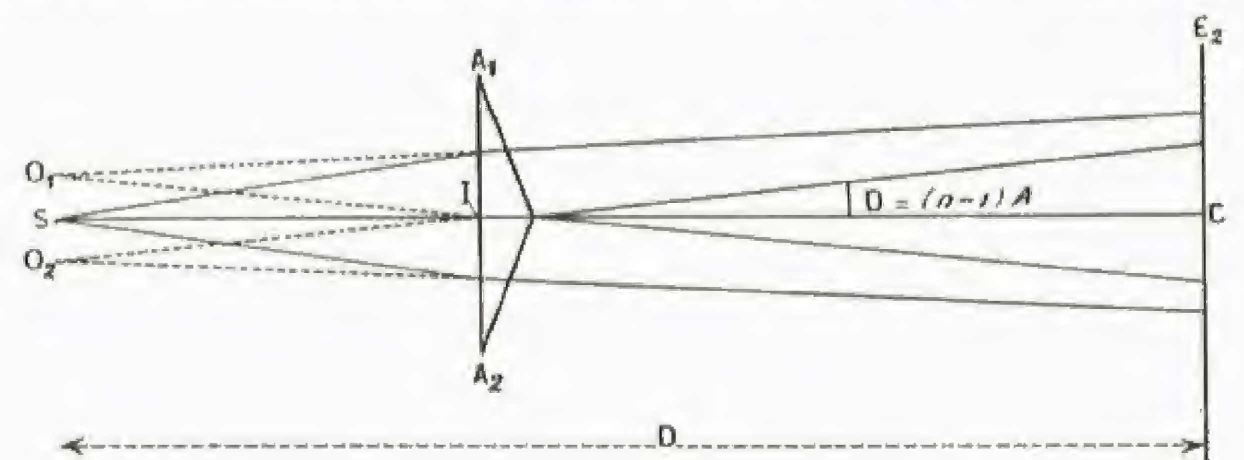


Fig. 332

figura 332 se ve inmediatamente que la distancia $O_1O_2 = 2SI\ tg\ \widehat{D}$; o, substituyendo $tg\ \widehat{D}$ por el arco, evaluado en radianes: $O_1O_2 = 2SI\ (n - 1)\ \widehat{A}$; esta distancia desempeña la función de a, en la experiencia de los orificios de Young; colocando una pantalla a una distancia D = SC, se observan franjas con una separación dada por la fórmula $e = \lambda \dfrac{D}{a}$.

Espejos de Fresnel. — En el dispositivo de Fresnel, la luz emitida por una fuente S incide sobre dos espejos, M_1 y M_2, que forman un ángulo pequeño α.

Tomemos como plano de figura el trazado por S perpendicularmente a la intersección I de los dos espejos M_1 y M_2 (*fig.* 333).

Los dos espejos dan de S las imágenes O_1 y O_2, respectivamente simétricas de S con respecto a los planos de ambos espejos, y los rayos procedentes de S parecen, después de reflejarse, venir de O_1 y O_2 que desempeñan el papel de orificios de Young.

Se observan franjas de interferencia en toda la región común a los dos haces reflejados (parte sombreada).

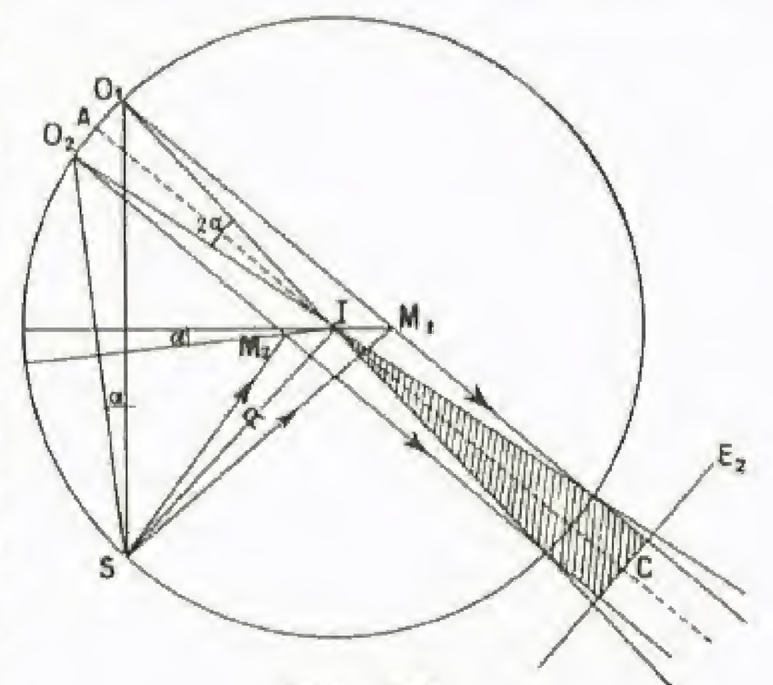


Fig. 333

Experimentalmente, la distancia SI de la fuente a la intersección de ambos espejos es conocida, o sea R; O_1 y O_2 están situados en la cir-

cunferencia de centro I y radio IS; el ángulo $\widehat{O_1IO_2} = 2\alpha$ (ángulo en el centro que subtiende el mismo arco que el ángulo O_1SO_2, que es a su vez igual a α por tener sus lados perpendiculares); se tendrá, pues, $O_1O_2 = 2R \cdot \alpha$ (estando α evaluado en radianes); para volver de nuevo a las notaciones de la experiencia de Young, bastará considerar $a = 2\,R\alpha$. (A, punto medio de O_1O_2) y a una distancia $D = AI + IC = R + IC$; la distancia IC desde la pantalla al eje del espejo se mide directamente; el centro de las franjas es el punto C, y la interfranja es, como en el caso anterior, $e = \lambda \dfrac{D}{a}$.

Desde el punto de vista de luminosidad de las franjas puede reemplazarse ventajosamente el orificio S por una rendija paralela a la recta de intersección de los planos de los espejos.

Anillos de Newton. — Si se coloca sobre una lámina plana de vidrio AB (*fig.* 334) una lente planoconvexa COD de curvatura muy pequeña, el espacio comprendido entre el plano AB y la lente COD constituye una delgada lámina de aire, de espesor variable según la distancia al punto O, pero fija en el transcurso del tiempo. Si se dirige un haz luminoso en la dirección SI, y se recibe el haz reflejado, se observan anillos brillantes y obscuros, alternativamente, debidos a las interferencias de los rayos como los RR', cuyas diferencias de marcha varían con el espesor. Si se utiliza una luz monocromática, la amarilla, por ejemplo, se obtienen anillos muy claros que pueden contarse y medirse (véase la lámina fuera de texto).

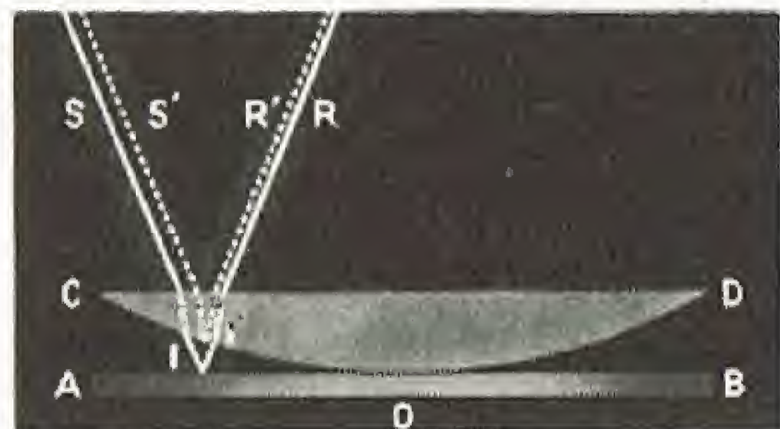


Fig. 334.—Anillos de Newton (El rayo R, refractado dos veces, interfiere con el rayo reflejado R')

Esta experiencia, debida a Newton, fue explicada por Fresnel, que la incluyó en el campo de los fenómenos de interferencia. En la misma lámina figuran las coloraciones observadas cuando se hace incidir un haz de luz blanca sobre una burbuja de jabón (lámina delgada transparente): se obtiene un conjunto de coloraciones que recuerdan las que se consiguen al descomponer la luz por medio de un prisma (v. ÓPTICA, pág. 87).

Si se utilizan dos láminas de vidrio de caras paralelas, formando un ángulo pequeño, el fenómeno es análogo, pero las franjas obtenidas son rectilíneas. Son las franjas de la "cuña de aire".

Láminas semiplateadas. — Depositando sobre una lámina de vidrio, mediante plateado químico o pulverización catódica, una capa delgada de plata, de unas centésimas de micra de espesor, se obtiene una superficie que, aunque permanece transparente, adquiere un poder reflector notable.

Consideremos dos láminas paralelas así plateadas, A y B. Un rayo incidente SI se refracta y se refleja primeramente en J, después en J_1, etc., obteniéndose así para cada rayo incidente varios rayos emergentes paralelos R, R_1, R_2, ..., cada uno de los cuales presenta, con el anterior, la misma diferencia de marcha. Esta diferencia de marcha depende del ángulo de incidencia i (*fig.* 335). Una lente O hace que converjan en M. Este punto estará iluminado si la diferencia de marcha es un múltiplo entero de la longitud de onda, y obscuro en el caso contrario. En el foco de la lente se observan, en luz monocromática, franjas circulares centradas sobre la perpendicular a las láminas que pasan por la fuente luminosa. Las franjas así obtenidas son muy finas y están separadas por franjas obscuras mucho más anchas, mientras que con los aparatos anteriores las franjas brillantes y las franjas obscuras tenían el mismo espesor; por consiguiente, puede medirse con mucha más precisión la posición de las franjas brillantes.

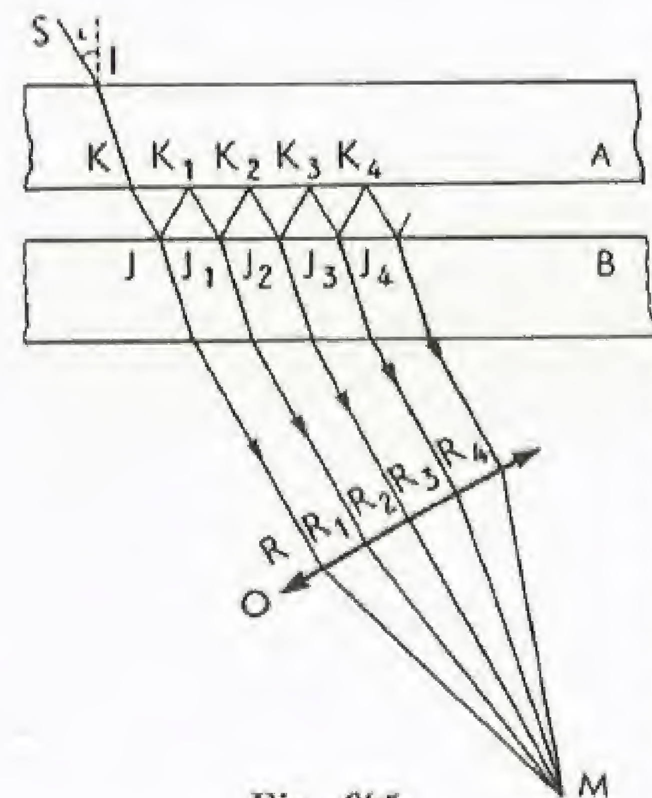


Fig. 335

Longitudes de onda de las radiaciones luminosas. — Las experiencias de interferencia permiten determinar, como ya se ha indicado, las longitudes de onda de las radiaciones luminosas; para el espectro visible, estas longitudes de onda están comprendidas entre 0,8 micras ($0{,}8 \times 10^{-3}$ mm) u 8 000 unidades angstrœm (la unidad angstrœm vale 10^{-8} cm) en la extremidad roja del espectro, y 0,38 micras o 3 800 angstrœms hacia la extremidad violeta.

El período de vibración de una radiación de longitud de onda λ es dado por la relación $\lambda = VT$, donde V es la velocidad de la luz, o sea 300 000 km/s ($3 \cdot 10^{10}$ cm/s) en el vacío, y también, prácticamente, en el aire.

Obtengamos el período de la vibración amarilla del sodio; como la longitud de onda en el aire es de 0,590 micras, es decir, aproximadamente, $6 \cdot 10^{-5}$, se tendrá la frecuencia

$$N = \frac{1}{T} = \frac{1}{2}\,10^{15}.$$

Las radiaciones luminosas corresponden, pues, a fenómenos vibratorios de frecuencias muy elevadas.

Es sabido que las velocidades de propagación de una misma radiación en dos medios de índices de refracción diferentes están en razón inversa de dichos índices; como el período de una radiación es independiente del medio, se deduce de ello que las longitudes de onda de una misma radiación están en razón inversa de los índices.

Una radiación se caracteriza, por consiguiente, ya por su período —o su frecuencia—, ya por su longitud de onda en el vacío o, prácticamente, en el aire, en el cual su índice es aproximadamente la unidad.

Éter luminoso. Vibraciones electromagnéticas. — Para explicar la propagación de la luz en el vacío se ha emitido la hipótesis de una substancia imponderable susceptible de transmitir las vibraciones de una fuente; esta substancia debería ser también elástica, y se ha denominado "éter luminoso".

Se sabe actualmente que las radiaciones luminosas son de la misma naturaleza que las ondas hertzianas de la telegrafía sin hilos, de las cuales sólo difieren por las longitudes de onda; el modo de producción de las ondas hertzianas muestra que se está en presencia de un fenómeno eléctrico y magnético.

Según la teoría electromagnética de la luz, desarrollada con éxito por Maxwell, las vibraciones luminosas no son un fenómeno mecánico que afecte al éter, sino que corresponden a variaciones periódicas del campo magnético y eléctrico, variaciones que se propagan sucesivamente con la velocidad de la luz.

Difracción. — Las superficies de onda, es decir, los lugares geométricos de los puntos del espacio en los cuales las vibraciones luminosas procedentes de una fuente puntual están en fase, en un instante dado, son esferas que tienen como centro la fuente. Cuando una de esas esferas encuentra un obstáculo con una abertura O (*fig.* 336), pueden ocurrir dos casos:

1º Que todas las dimensiones de la abertura sean grandes con respecto a la longitud de onda de las vibraciones; en este caso, el sistema de ondas, después de haber atravesado la pantalla, está comprendido aproximadamente en el cono geométrico de vértice S y base O; las ondas sólo desbordan ligeramente los bordes, y el fenómeno se desarrolla aproximadamente como si la propagación de la luz fuera rectilínea.

Fig. 336

2º Si las dimensiones de la abertura son del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de la luz, el fenómeno de desbordamiento de las ondas exteriormente al cono geométrico adquiere, relativamente, más importancia; la abertura pequeña O se convierte, conforme al principio de Huygens, en el origen de un nuevo sistema de ondas cuya extensión aumenta cuanto más pequeña es la abertura: se dice entonces que hay "difracción".

En la experiencia de Young, cada orificio actúa como un centro de difracción; las franjas antes descritas resultan de la interferencia de las vibraciones difractadas por los dos orificios O_1 y O_2.

También se producen fenómenos de difracción análogos con las vibraciones sonoras: un observador separado de una fuente sonora por una pantalla perforada percibe los sonidos incluso si no está situado en el cono geométrico definido por la fuente y la abertura. En este caso, la difracción se produce con aberturas mucho más grandes, porque las longitudes de onda de las vibraciones sonoras son considerablemente mayores que las longitudes de onda de las vibraciones luminosas.

Experiencia de difracción. — La luz emitida por una rendija F (*fig.* 338) incide sobre una lente que da una imagen F' de F; si se coloca en F' una pequeña pantalla opaca e, un poco mayor que F', se intercepta completamente la luz y una pantalla E situada detrás de e estará completamente obscura. En el haz que incide sobre la lente se coloca un peine o un pincel P, con dientes o pelos finos y apretados, y puede comprobarse que la luz reaparece sobre la pantalla E; en particular, si se coloca la pantalla E en el plano de la imagen geométrica del peine con respecto a la lente, puede verse la imagen de este último con claridad.

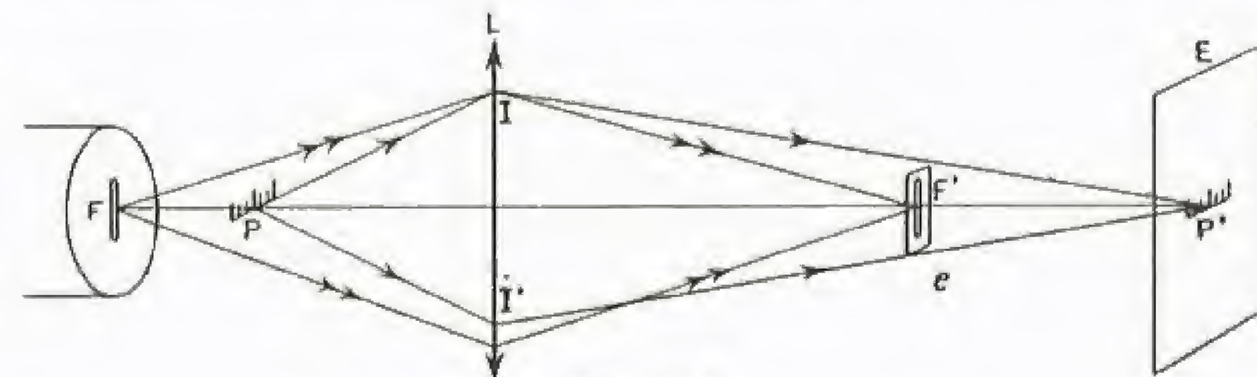


Fig. 337

El fenómeno se produce como si las pequeñas aberturas formadas por los intersticios de los dientes se hubiesen convertido en fuentes

luminosas y enviaran sobre la lente rayos difractados, como PI, PI', entre los cuales los refractados a través de la lente ya no son detenidos por la pantalla *e*.

Retículo. — Se denomina retículo una lámina de vidrio en la que se han grabado trazos paralelos equidistantes y muy próximos: por ejemplo, 100 trazos en un milímetro. Al iluminar un retículo, las partes transparentes de vidrio funcionan como fuentes de luz difractada.

Proyectemos sobre una pantalla, por medio de una lente, la imagen de una rendija iluminada con luz monocromática, y coloquemos después un retículo entre la lente y la imagen, perpendicularmente a la dirección media del haz, y con los trazos paralelos a la rendija: se observarán una serie de imágenes de la rendija debidas a la interferencia de los haces difractados por las diferentes rendijas.

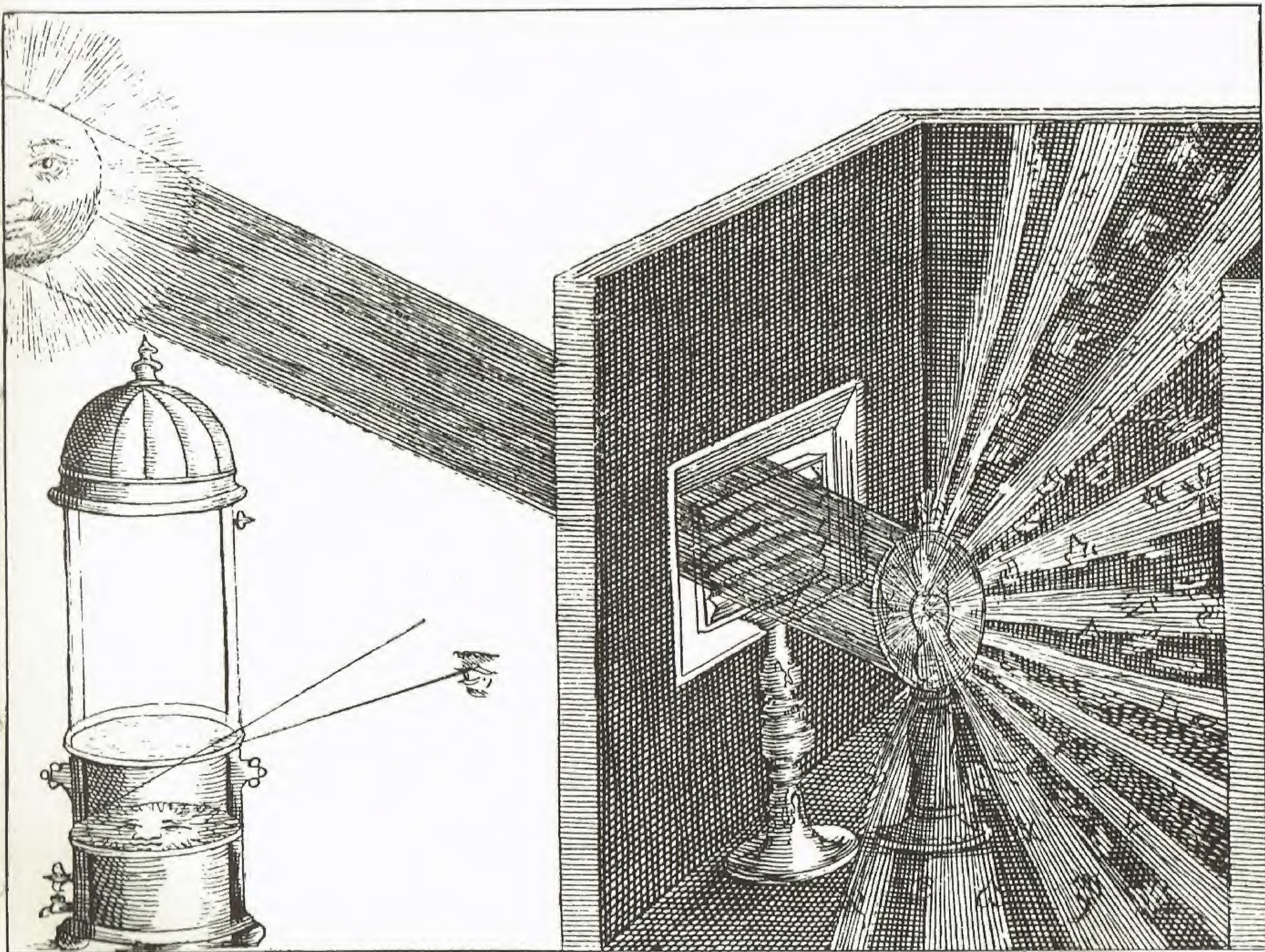
Si se utiliza luz compleja, las imágenes relativas a las diferentes variaciones componentes están yuxtapuestas y no se confunden, obteniéndose lo que se denomina un "espectro", o incluso varios espectros llamados "espectros de diferentes órdenes".

Los espectros de retículo son, por lo general, menos luminosos que los espectros de prisma; en cambio, las desviaciones son proporcionales a las longitudes de onda. Tales espectros se denominan "normales" y son útiles en ciertas investigaciones.

Se observará fácilmente el espectro de la luz emitida por una lámpara de incandescencia tomando, por ejemplo, un disco de un gramófono, de preferencia microsurco, y colocando el ojo sobre el borde del disco, cuyo plano se dirigirá hacia la lámpara colocada a una distancia de unos metros. En este caso, son los surcos del disco los que difractan la luz actuando como las rayas de un retículo.

A. Guillemonat

Refracción y difusión de la luz solar según un grabado antiguo





Vista parcial de uno de los transformadores de la fábrica de Brommat (pantanos de la Truyère [*Cl. F. Kollar*])

Electricidad y magnetismo

La electricidad es una de las manifestaciones de la energía, y se produce cuando se frotan dos cuerpos, o por una acción mecánica cualquiera, como la compresión, o también por la acción del calor sobre ciertos cristales.

Históricamente, que es el orden de exposición que seguiremos, se conoció primero sólo la *electricidad estática*, es decir, la electricidad en equilibrio en los conductores. Los físicos se interesaban, a la vez que por la electricidad estática, por la atracción que ciertas piedras, denominadas "piedras de imán", ejercían sobre el hierro. Esta propiedad de los imanes, magnetismo, presentaba cierta analogía con la de los cuerpos electrizados.

Hacia 1800, Volta descubrió la corriente eléctrica y sus émulos trataron de dilucidar el mecanismo de la pila hasta el momento en que, gracias al genio de *Ampère*, *Arago* y *Faraday*, fueron creadas la electrodinámica y el electromagnetismo.

La electrodinámica estudia las leyes del desplazamiento de la electricidad de un cuerpo a otro, y el electromagnetismo las acciones recíprocas entre imanes y corrientes.

Electricidad estática

Reseña histórica. — **Los datos fundamentales de la experiencia:** Electricidad por frotamiento. Conductores. Aisladores. Las dos clases de electricidad. Electroscopio de panes de oro. — **Ley de Coulomb. Masa eléctrica, Campo eléctrico:** Ley de Coulomb. Masa eléctrica. Campo eléctrico. Representación geométrica de un campo; líneas de fuerza. Unidad de cantidad de electricidad, unidad de campo eléctrico. Consecuencia: adición de las cargas eléctricas. Principio de conservación de la electricidad. — **Consecuencias de la ley de Coulomb. Potencial. Flujo. Campo newtoniano:** Potencial. Superficies equipotenciales. Unidad de diferencia de potencial. Flujo electrostático. Propiedades del flujo electrostático. Teorema de Gauss. Tubos de fuerza. Definición y propiedades del campo newtoniano. — **Propiedades de los conductores en equilibrio eléctrico. Presión electrostática. Cilindro de Faraday:** Campo en el interior de un conductor macizo. Campo en el espacio próximo de la superficie de un conductor. Presión electrostática. Campo en el interior de un conductor hueco. Cilindro de Faraday. Distribución de la electricidad a lo largo de un conductor. Poder de las puntas. — **Influencia eléctrica. Pantallas eléctricas. Capacidad. Condensadores:** Influencia eléctrica. Teorema de los elementos correspondientes. Influencia total. Aplicación al cilindro de Faraday. Atracción de los cuerpos ligeros. Pantallas eléctricas. Teorema de las pantallas eléctricas. Capacidad. Unidad de capacidad. Coeficiente de influencia. Cálculo del coeficiente de influencia en el caso de la influencia total. Condensadores. Dieléctricos y rigidez eléctrica. Condensadores usuales. Calentamiento dieléctrico. Asociación de condensadores. — **Medidas electrostáticas. Energía electrostática. Máquinas electrostáticas:** Generalidades. Electrómetro absoluto de lord Kelvin. Electrómetro de cuadrantes. Electrómetro de panes de oro. Procedimientos electrométricos modernos. Medida de capacidades. Medida de cargas eléctricas. Energía eléctrica. Energía de un condensador. Máquinas electrostáticas. Origen de la energía eléctrica suministrada por las máquinas. Piezoelectricidad

Reseña histórica. — El primer fenómeno eléctrico observado, la acción que ejerce el ámbar frotado sobre los cuerpos ligeros, es conocido desde hace mucho tiempo. **Tales de Mileto,** que vivió en el año 600 antes de J. C., fue quien primero describió este fenómeno, aunque no parece que haya sido su descubridor. **Plinio el joven** (70 años después de J. C.) menciona el mismo hecho y cita otra piedra (turmalina) que goza de la misma propiedad; por esa época ya se conocía la acción eléctrica del pez espada, que fue utilizada por **Aristóteles** para curar un ataque de gota.

El primer hecho que puede atribuirse al *magnetismo*, que ya cono-

cieron los griegos, fue la acción que ejercía cierta piedra, denominada piedra de Heracles, o de Lidia, o también piedra de hierro o magnética, sobre el hierro. Aristóteles fue quien primero observó la imantación pasajera que adquiere el hierro dulce bajo la influencia de los imanes. Los chinos también tuvieron, al parecer, conocimiento de la brújula varios siglos antes de nuestra era.

Durante la Edad Media no se descubrieron nuevos hechos relacionados con la electricidad, y hasta **Gilbert** (1540-1603) no se procede a un estudio metódico de estos fenómenos. Gilbert muestra que el ámbar amarillo no es el único cuerpo capaz de electrizarse por frotamiento, sino que son numerosas las substancias que gozan de esta propiedad; otras substancias son incapaces de electrizarse y se denominan no eléctricas. Gilbert comprueba, además, la influencia de la humedad del aire sobre los fenómenos eléctricos y es el primero en distinguir los fenómenos magnéticos de los fenómenos eléctricos, hasta entonces confundidos.

En el siglo XV ya se conocía la brújula. **Cristóbal Colón** (1451-1506) hace observaciones muy reveladoras sobre las variaciones del ángulo de la aguja con respecto a la línea Norte-Sur.

En 1576, **Normann** descubre la inclinación, al suspender una aguja imantada de forma que pueda moverse en un plano vertical. **Dalencé** y **Hartsoeker** (1656-1725) atribuyen la acción magnética de la Tierra a su rotación alrededor del Sol.

Otto de Guericke (1602-1686) fue el inventor de la primera máquina eléctrica: esta máquina era una esfera de azufre que se hacía girar mientras una persona mantenía apoyadas sus manos sobre la misma para producir el frotamiento necesario. Con esta máquina rudimentaria, Otto de Guericke vio y oyó la primera chispa eléctrica y observó también que los cuerpos atraídos por un cuerpo electrizado eran inmediatamente rechazados hasta el momento en que, al tocarlos, podían ser nuevamente atraídos. **Boyle** repitió en el vacío las experiencias sobre la electricidad que se hacían en el aire.

El doctor Wall, en 1708, comparó la chispa eléctrica con el relámpago y su crepitación con el trueno que acompaña al rayo. **Graham** determinó, en 1723, la intensidad del magnetismo. **Gray** descubrió, en 1729, la **conductibilidad** e hizo la primera experiencia de transporte de fuerza a distancia por medio de una cuerda de cáñamo sobre hilos de seda, una de cuyas extremidades estaba en relación con el tubo que frotaba mientras que la otra estaba unida a una pequeña esfera de marfil.

Dufay (1699-1739) mostró que todos los cuerpos pueden electrizarse y observó que el vidrio adquiere, por frotamiento, una electricidad diferente de la que adquiere la resina al ser también frotada: de ahí los nombres de electricidad vítrea y electricidad resinosa.

Las máquinas eléctricas fueron perfeccionándose simultáneamente (Nollet, Hansen, Winkler, máquinas de discos de vidrio, 1766) y las chispas que producían eran cada vez más visibles. En 1746, **Musschenbroek** hizo un descubrimiento asombroso: el de la **condensación eléctrica** con la botella de Leyden, que permitió aumentar considerablemente los efectos de las chispas. **Franklin** (1706-1790) descubrió el **poder de las puntas,** que aplicó a la defensa de las casas y los navíos contra el rayo (pararrayos), y estudió la electricidad de las nubes. **Canton** (1718-1772) descubrió, en 1754, la **electrización por influencia.** Al mismo tiempo que se sucedían los descubrimientos, fueron estableciéndose teorías: Watson y Franklin admitieron que el frotamiento no crea la electricidad, sino que modifica su estado de distribución en el cuerpo frotado y en el frotador: la electricidad que pierde uno de ellos es ganada por el otro.

Symmer, en 1759, se basó en las ideas de Dufay para explicar los fenómenos eléctricos por la consideración de dos fluidos.

Coulomb (1736-1806) estudió las leyes de las atracciones y repulsiones eléctricas por medio de la balanza de torsión, demostró que estas acciones son inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia, e hizo extensivas estas leyes al magnetismo. Determinó cómo se extiende la electricidad en la superficie de los cuerpos conductores y estableció la ley de pérdidas de electricidad.

Laplace, Biot y **Poisson** afianzaron los conocimientos sobre la electricidad estática al establecer de nuevo analíticamente los resultados de Coulomb.

Los perfeccionamientos sucesivos consistieron en la construcción de potentes máquinas debidas a **Ramsden** (1735-1800), y **Holtz** (1836-1913) y de electrómetros sensibles, y desde el punto de vista teórico, en la introducción en los cálculos de la noción de potencial, debida a **Neumann** (1798-1895).

Los datos fundamentales de la experiencia

Electricidad por frotamiento. — Al frotar un pedazo de ámbar de vidrio o de ebonita con un trapo o con una piel de gato, esas materias adquieren, como es sabido, la propiedad de atraer los cuerpos ligeros. Se dice entonces, *por definición*, que el trozo de ámbar, de vidrio o de ebonita se han cargado de electricidad o *se han electrizado.*

Si se intenta repetir esta experiencia con hierro o con cobre, se presentan dificultades: en efecto, si frotamos uno de estos cuerpos, incluso muy enérgicamente, mientras lo sostenemos con la mano, no se observa nada. Existen, pues, dos clases de cuerpos: los que se electrizan por frotamiento cuando están sostenidos con la mano, y los que no se electrizan en dichas condiciones. A pesar de ello, es posible electrizar cuerpos como el cobre o el hierro: basta para ello colocarlos sobre un soporte constituido por materias del primer grupo. Por ejemplo, si se coloca una esfera de cobre en un pie de vidrio, se electriza perfectamente por frotamiento, pero si tocamos dicha esfera con el dedo, la electrización cesa instantáneamente. Lo mismo sucede si la tocamos con un hilo metálico o si, para suprimir el papel que desempeña el cuerpo humano, conectamos directamente la esfera con el suelo a través de un hilo metálico. Por consiguiente, desde el punto de vista de sus propiedades eléctricas, debe incluirse el cuerpo humano en el grupo del cobre, el hierro, etc.

Conductores. Aisladores. — Los cuerpos del primer grupo: vidrio, ámbar, ebonita, se electrizan por frotamiento cuando se les sostiene con la mano, y conservan su estado de electrización cuando se unen con el suelo a través de cualquier cuerpo: los denominaremos *aisladores* o *dieléctricos*. Los del segundo grupo no se electrizan por frotamiento más que cuando se mantienen aislados del suelo por medio de un cuerpo del primer grupo. Conservan su electrización mientras no estén unidos a la tierra por un cuerpo de su mismo grupo: los denominaremos *conductores.*

Entre los aisladores pueden citarse el vidrio, el caucho, la seda, la mica y el papel, y entre los conductores, todos los metales, el agua, el cuerpo humano, etc.

Para explicar los fenómenos precedentes, se hizo la hipótesis de que la electrización es debida a la presencia de un fluido: la electricidad, que se desplaza sin impedimento alguno en los conductores, mientras que no puede, en cambio, desplazarse en los aisladores.

Con esta hipótesis, consideremos un aislador electrizado: la electricidad no puede desplazarse a través del mismo, por lo cual se conservará cargado, incluso si alguna de sus partes está unida directa o indirectamente a la tierra.

Tomemos, en cambio, un conductor: al unirlo al suelo, mediante otro conductor, desaparece la electricidad; diremos entonces que fluye a la tierra a través del conductor, porque está sometida a una fuerza. Es decir, en otras palabras, existe una diferencia de nivel eléctrico entre el conductor cargado y la tierra.

Como la electricidad se desplaza libremente en un conductor, un cuerpo de esta naturaleza debe electrizarse en toda su superficie, incluso aunque sólo se frote un punto del mismo, como puede comprobarse.

En cambio, un aislador no se electriza sino en los puntos en que se le frota.

Las dos clases de electricidad. — Suspendamos ahora de un hilo de seda una esferilla de saúco (cuerpo conductor) (*fig.* 338); si se le aproxima una varilla de vidrio electrizada, se observará que atrae la esferilla, hasta el momento en que la toca; en este momento, la rechazará vivamente. La esferilla de saúco se ha electrizado, como puede comprobarse observando la atracción que ejerce sobre los cuerpos ligeros. Acerquemos ahora una varilla de ebonita electrizada, y se observará que atrae la esferilla; si se acerca de nuevo una varilla de vidrio, la esferilla es rechazada, de donde se llega a la conclusión de que la electricidad de la varilla de ebonita no es la misma que la de la varilla de vidrio. La primera se ha denominado *electricidad negativa o resinosa*, y la segunda *electricidad positiva o vítrea.*



Fig. 338

Las experiencias anteriores pueden, pues, resumirse diciendo que *dos cuerpos cargados de electricidad del mismo nombre se repelen y dos cuerpos cargados de electricidad de nombre distinto se atraen.*

Electroscopio de panes de oro. — Este instrumento, que permite descubrir electrizaciones pequeñas, se compone de una varilla metálica A (*fig.* 339) que se prolonga con dos laminillas de oro muy ligeras, b) y c). La parte inferior de la varilla y las laminillas de oro están encerradas en un recipiente metálico denominado caja, cuyas dos caras opuestas tienen una parte de vidrio, a fin de que puedan verse las laminillas. La varilla atraviesa un tapón de parafina que la aisla de la caja.

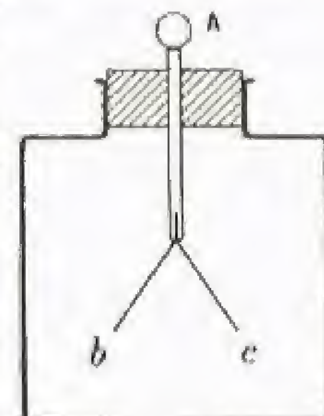


Fig. 339

Para comprobar que un cuerpo está electrizado, basta ponerlo en contacto con la varilla A, ya directamente, ya por medio de un conductor: la menor electrización hace que se separen las laminillas de oro, puesto que están cargadas de electricidad de la misma clase. También podrá emplearse una sola lámina, que se apartará de la varilla a la que esté pegada.

Ley de Coulomb. Masa eléctrica. Campo eléctrico

Ley de Coulomb. — Como consecuencia de delicadas experiencias, Coulomb enunció la siguiente ley, que lleva su nombre:

Dos puntos electrizados de dimensiones muy pequeñas se atraen o se repelen mutuamente según la recta que los une; la fuerza atractiva o repulsiva existente es inversamente proporcional al cuadrado de su distancia.

Las consecuencias de esta ley han podido ser verificadas experimentalmente, con frecuencia de una manera muy precisa, lo que constituye la mejor prueba de su exactitud.

Masa eléctrica. — La analogía que existe entre la ley de Coulomb y la de Newton relativa a la gravitación universal es evidente, por lo

cual se ha pensado definir la masa o carga eléctrica como se ha definido la masa gravitatoria. Sea un punto electrizado A. (*fig.* 340) positivamente, por ejemplo, y coloquemos a la distancia d de A otro punto electrizado positivamente B; este punto rechaza el punto A con una fuerza determinada F. Se dirá entonces que un punto electrizado C tiene la misma carga eléctrica que B cuando colocado a la distancia d de A lo repele con la misma fuerza $\vec{F}$. Si otro punto electrizado D, colocado a la distancia d de A, lo atrae en lugar de repelerlo con la misma fuerza $\vec{F}$, se dirá que D posee la misma carga que B, pero de signo diferente. A las cargas eléctricas positivas se les atribuye el signo + y a las cargas eléctricas negativas el signo —.



Fig. 340

Por último, si otro punto electrizado E, también colocado a la distancia d de A, lo rechaza con una fuerza doble, triple o cuádruple de la fuerza F, se dirá que la carga eléctrica de E es doble, triple o cuádruple de la de B.

De esta forma se define completamente la carga eléctrica, y sólo falta escoger una unidad que permita medirla. Antes de nada observaremos que, como consecuencia de nuestra definición, la fuerza $\vec{F}$ que ejerce un punto electrizado B de carga eléctrica q sobre un punto A de carga eléctrica q', es proporcional a q; recíprocamente, la fuerza $\vec{F'}$ que ejerce A sobre B es proporcional a q'; pero, con arreglo al principio de la acción y la reacción, $\vec{F} = \vec{F'}$, y por consiguiente $\vec{F}$ (o $\vec{F'}$) es proporcional a q y a q', y por tanto a su producto qq'. Como sabemos que $\vec{F}$ es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia d entre los dos puntos electrizados A y B, podrá escribirse

$$F = k \frac{qq'}{d^2},$$

en donde k es una constante que sólo depende de las unidades escogidas. Esta fórmula resume la ley de Coulomb, y es absolutamente idéntica a la que expresa la ley de la gravitación.

Si las dos cargas q y q' son del mismo signo, la fuerza $\vec{F}$ será una fuerza de repulsión y la cantidad $\frac{qq'}{d^2}$ será positiva. Si, al contrario, q' y q tienen diferentes signos, la fuerza $\vec{F}$ será una fuerza de atracción y la cantidad $\frac{qq'}{d^2}$ será negativa. Esta fórmula será por consiguiente correcta en magnitud y en signo, a condición de considerar las repulsiones como positivas y las atracciones como negativas. Si se hace así, la constante k es necesariamente positiva.

Campo eléctrico. — Todo cuerpo de masa gravitatoria m colocado en la proximidad de la tierra está sometido a una fuerza —su peso— cuyo valor es el producto por m de una determinada cantidad g denominada aceleración de la gravedad en dicho punto. Por analogía, podrá decirse que una carga eléctrica q, situada en la proximidad de un cuerpo electrizado A, está sometida a una fuerza $\vec{F}$ cuyo valor es el producto de q por un vector $\vec{E}$:

$$\vec{F} = q\,\vec{E}.$$

Por ejemplo, si el cuerpo A es un punto electrizado de carga q' y la distancia entre ambas cargas q' y q es d, se tendrá $\vec{F} = k \frac{qq'}{d^2}$ y, por consiguiente, $\vec{E} = \frac{kq'}{d^2}$.

El vector $\vec{E}$ ha recibido el nombre de *vector campo eléctrico*; por ejemplo, se dirá que el punto A crea a su alrededor un campo eléctrico cuyo valor a la distancia d de A es $\frac{kq'}{d^2}$. Por esta misma expresión, se observará que el valor del campo varía cuando varía la distancia d, es decir, cuando se consideran puntos diferentes del espacio que rodea A.

La igualdad vectorial $\vec{F} = q\vec{E}$ indica la relación entre los valores de $\vec{F}$ y $\vec{E}$, y también que ambos vectores tienen la misma dirección y el mismo sentido si q es positivo, y sentidos contrarios si q es negativo.

Podrá decirse entonces que el vector campo $\vec{E}$ representa la fuerza que se ejercería sobre una carga eléctrica positiva unitaria colocada en el punto considerado.

Así, pues, queda definido para todos los puntos del espacio que rodean un cuerpo electrizado un *vector* denominado *vector campo eléctrico*, o más sencillamente *campo eléctrico*, que tiene como valor, soporte y sentido el de la fuerza que se ejerce sobre la masa eléctrica unitaria positiva colocada en ese punto.

Representación geométrica de un campo; líneas de fuerza. — Consideremos una carga eléctrica positiva colocada en un campo y que pueda desplazarse libremente. En cada punto estará dirigida en el sentido del campo en dicho punto, es decir, describirá una trayectoria tangente en cada uno de estos puntos al campo en ese punto (*fig.* 341). Tal trayectoria se denomina *línea de fuerza*.

Habitualmente, un campo se representa por sus líneas de fuerza; a estas líneas de fuerza se les da un sentido, indicado por una flecha, que es el sentido en el que es descrito por una carga positiva que se desplaza libremente.

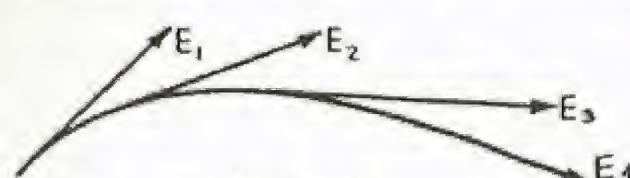


Fig. 341

EJEMPLOS. Consideremos el campo gravitatorio. Todo cuerpo que en él se desplaza libremente describe una vertical, de arriba abajo. Las líneas de fuerza del campo gravitatorio serán, pues, verticales (*fig.* 342) dirigidas hacia abajo.

Consideremos el campo creado por una carga puntual positiva A. Si colocamos en dicho campo otra carga positiva que pueda desplazarse libremente, esta carga será rechazada por la primera y describirá una recta que se aleja del punto A.

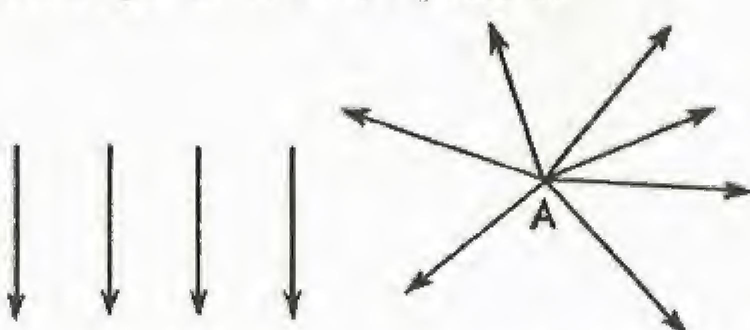
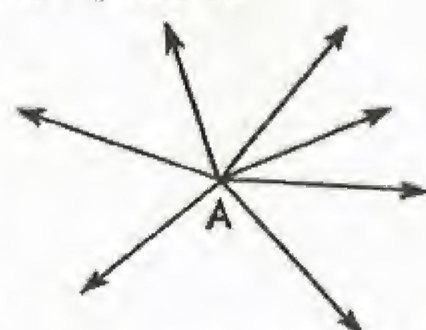





Fig. 342 *Fig.* 343 *Fig.* 344

Las líneas de fuerza del campo considerado son las rectas trazadas desde A y que se alejan de dicho punto A (*fig.* 343). Si la carga colocada en A fuera negativa, las líneas de fuerza seguirían siendo rectas procedentes de A (*fig.* 344), pero dirigidas hacia dicho punto A.

Las líneas de fuerza de un campo eléctrico pueden materializarse: bastará para ello pegar sobre una placa de vidrio una o varias hojas de estaño, electrizándolas de cualquier forma y depositando sobre dicha placa cerdas de cepillo cortadas en trozos muy pequeños. Si se golpea ligeramente la placa de vidrio, observaremos que las cerdas se orientan según las líneas: estas líneas son las líneas de fuerza del campo considerado. La figura resultante es el *espectro* del campo eléctrico (*fig.* 345).

Unidad de cantidad de electricidad, unidad de campo eléctrico. — La fórmula que expresa la ley de Coulomb se escribe frecuentemente

$$(1) \qquad F = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{qq'}{d^2},$$

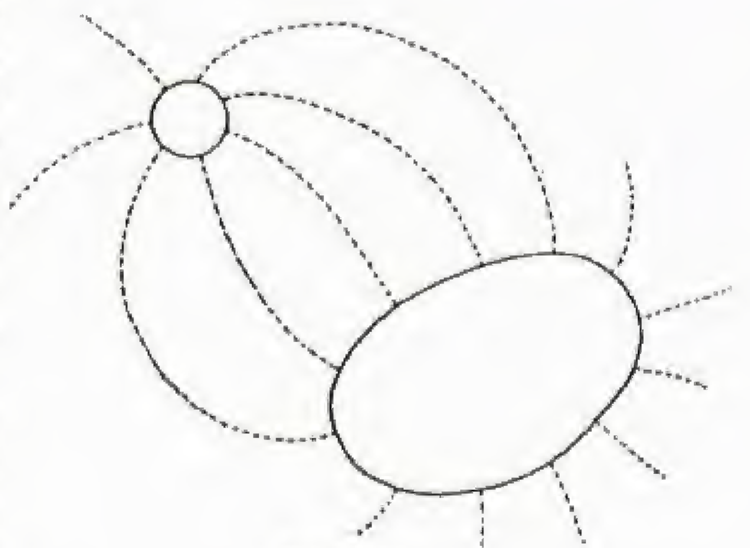
donde ϵ es la constante dieléctrica, o permitividad del medio considerado.

1° *Sistema electrostático C.G.S.* — En este sistema se toma, por convenio, la permitividad del vacío ϵ_0 igual a la unidad. La fórmula (1) se escribirá entonces

$$F = \frac{qq'}{d^2}.$$

La unidad electrostática C.G.S. (U.E.S.C.G.S.) de carga eléctrica es la carga puntual que al actuar en el vacío sobre una carga idéntica situada a un centímetro de distancia la repele con la fuerza de 1 dina. Esta unidad no tiene nombre oficial.

La relación $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ permite definir la correspondiente unidad de campo: *la unidad electrostática C.G.S. de intensidad de campo eléctrico es la intensidad del campo que ejerce una fuerza de 1 dina sobre una carga igual a la unidad C.G.S.*


Fig. 345

2° *Sistema práctico Giorgi (M.K.S.A.).* — En este sistema, que tiene como unidades fundamentales el metro, el kilogramo-masa, el segundo y el amperio, y que tiende en la actualidad a substituir a los restantes, *la unidad de carga eléctrica o cantidad de electricidad es el culombio (C)*, que se define en electromagnetismo.

$$1 \text{ Culombio} = 3.10^9 \text{ U.E.S.C.G.S.}$$

La relación (1)se convierte en

$$F = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{qq\cdot}{d^2},$$

siendo el valor de ϵ en el vacío $\frac{1}{9.10^9}$.

La fuerza F está expresada en newtons y d en metros.

La unidad del campo eléctrico es la intensidad del campo que ejerce una fuerza de 1 newton sobre una carga de 1 culombio. Es el voltio-metro.

Consecuencia: adición de las cargas eléctricas. — Coloquemos en un punto A dos cargas puntuales iguales y de signos contrarios

$+q$ y $-q$. El punto A ejerce sobre una carga q' colocada en un punto B dos fuerzas opuestas $\vec{F}$ y $\vec{F'}$ dirigidas según AB. Se tendrá

$$F = \frac{+qq'}{r^2}, \qquad F' = \frac{-qq'}{r^2}.$$

La fuerza resultante que actúa sobre la carga q', igual a la suma F + F', es nula. Sucederá como si la carga de A fuera nula, es decir, como si el punto A tuviera la carga:

$$Q = (+q) + (-q).$$

Si se colocan ahora en el punto A dos cargas iguales a $+q$, la fuerza F″ que actúe sobre B será la suma de las dos fuerzas F y F′ iguales a $\frac{qq'}{r^2}$.

Por consiguiente, $F'' = \frac{2qq'}{r^2}$ y el fenómeno ocurrirá como si la carga del punto A fuera

$$Q = (+q) + (+q).$$

En general, si se colocan sucesivamente en el punto A cargas q_1, q_2, q_3, etc., cualesquiera, sucederá como si la carga Q del punto A fuera igual a la suma algebraica:

$$q_1 + q_2 + q_3 + \ldots,$$

lo que se expresa diciendo que las cargas eléctricas se suman algebraicamente.

Principio de conservación de la electricidad. — Sean dos discos fijados a varillas aisladoras (*fig.* 346) y cubiertas, una de ellas de vidrio, y la otra de tela. La carga de cada uno de los discos será, al principio, nula; al frotarlos mutuamente se electrizarán. El disco de vidrio se electrizará positivamente y el otro negativamente. Por tanto, aparecerán, simultáneamente, electricidad positiva y electricidad negativa. Este hecho es general: cada vez que se produce cierta cantidad de electricidad de una especie, se produce, simultáneamente, electricidad de la otra especie.

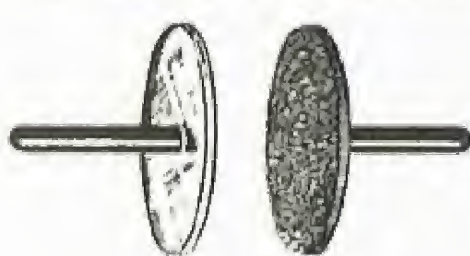


Fig. 346

A pesar de no haber aportado electricidad, se ha producido, lo que nos lleva a pensar que ambos discos contenían ya electricidad antes de la experiencia; como sus cargas eran nulas, era necesario que las cantidades de electricidad que contenían fueran iguales y de signos contrarios. Es decir, que la hipótesis que puede emitirse primeramente es la siguiente: *un cuerpo no electrizado contiene la misma cantidad de electricidad positiva y negativa.* Antes de la experiencia cada uno de los discos contenía, por lo tanto, cantidades iguales de electricidad positiva y negativa. Como la suma algebraica total de las cantidades de electricidad que contienen ambos discos es nula, parece natural admitir que sucederá lo mismo después de la experiencia, es decir, que las cargas que contienen ambos discos después de la experiencia serán iguales y de signos contrarios. Más adelante se indicará cómo se ha comprobado esta hipótesis. Por el momento se admitirá esta hipótesis y diremos que:

Cada vez que en un fenómeno se produce una cantidad determinada de electricidad de una clase, se produce también la misma cantidad de electricidad de la clase distinta; o también: *la suma algebraica de las cantidades de electricidad que contiene un sistema aislador es constante.*

Éste es el principio de conservación de la electricidad.

En efecto, con arreglo al mismo, la electricidad de un sistema aislado se conserva.

Consecuencias de la ley de Coulomb. Potencial. Flujo. Campo newtoniano

Potencial. — Sea un cuerpo pesado A, de masa m, que se desplaza desde un punto B situado a la altura h_1 del suelo a otro punto C situado a una altura h_2, menor. El trabajo que realizan las fuerzas de la gravedad durante el desplazamiento del cuerpo A. (v. MECÁNICA, página 241, vol. V), será

$$T = mg\ (h_1 - h_2)$$

(en donde g es la aceleración de la gravedad); este valor es el mismo, cualquiera que sea la trayectoria que siga el cuerpo A para ir de B a C.

La fórmula precedente puede escribirse también

$$T = m\ (gh_1 - gh_2).$$

Si designamos por V la cantidad variable $g \times h$, por V_B el valor de V en el punto B (es decir, gh_1) y por el V_C el valor de V en el punto C, se tendrá

$$T = m\ (V_B - V_C).$$

La cantidad V es la denominada generalmente *función potencial*, o, más simplemente, *potencial* del campo gravitatorio.

Cuando un cuerpo pesado de masa m se desplaza en el campo gravitatorio terrestre desde un punto B a un punto C, el trabajo de las fuerzas gravitatorias es independiente de la trayectoria seguida para ir de B a C, siendo igual al producto por m de la diferencia de potencial entre B y C.

Esta propiedad no es sólo característica del campo gravitatorio terrestre, sino que la posee cualquier campo gravitatorio. Cabe entonces preguntarse si, dada la extrema analogía que presentan los fenómenos eléctricos y los fenómenos gravitatorios, no existirá un *potencial eléctrico* que goce de la misma propiedad que el potencial gravitatorio. El cálculo permite responder afirmativamente a esta cuestión y muestra, además, que lo mismo ocurrirá con todos los fenómenos regidos por la ley de Coulomb. Podrá, pues, enunciarse:

En todos los puntos de un campo eléctrico puede definirse una cantidad, denominada función potencial o potencial, tal que cuando una carga puntual q se desplace desde un punto B a otro punto C de este campo, el trabajo que realizan las fuerzas eléctricas es igual al producto de la diferencia de los potenciales en B y C por q, cualquiera que sea la trayectoria que siga la carga q para ir de B a C.

Se expresará esto en la forma

$$T = q\ (V_B - V_C).$$

V_B y V_C designan los valores del potencial en B y C. De hecho, si en lugar de tomar como valores del potencial en B y C, V_B y V_C, tomáramos $V_B + k$ y $V_C + k$, se tendría

$$T = q\ [V_B + k - (V_C + k)],$$

lo que muestra que sólo queda bien definida la diferencia de potencial entre dos puntos, puesto que el valor absoluto del potencial en un punto no puede definirse por desconocerse el valor de la constante k. Para evitar esta indeterminación, basta con fijar de una vez para siempre el potencial de un punto determinado. Se conviene que: *el potencial de todo punto situado a una distancia infinita de una carga eléctrica cualquiera es nulo.*

Consideremos de nuevo la fórmula $T = q\ (V_B - V_C)$. Supongamos que $q > 0$; observaremos que el trabajo es motor si $V_B > V_C$ (y resistente en el caso contrario), ya que la fuerza que actúa sobre q está dirigida en el sentido de B a C, es decir, de potenciales decrecientes. Lo mismo ocurre con el campo, puesto que el campo y la fuerza tienen el mismo sentido ($q > 0$); pero el campo no depende de la carga q en él situada; por consiguiente, de una manera general, *el vector campo eléctrico está siempre dirigido en el sentido de los potenciales decrecientes.*

Superficies equipotenciales. — Se denominan *superficies equipotenciales* las superficies que tienen el mismo potencial en todos sus puntos. Cuando se desplaza una carga eléctrica q' sobre una superficie equipotencial, el trabajo de las fuerzas electrostáticas es constantemente nulo, puesto que la diferencia de potencial también lo es. Por consiguiente, las fuerzas electrostáticas que actúan o, lo que equivale a lo mismo, el campo en cada punto de una superficie equipotencial es normal a esta superficie en dicho punto. Recíprocamente, toda superficie normal en cada uno de sus puntos al campo en ese punto es una superficie equipotencial.

Consideremos el campo producido por una carga puntual A y tracemos una esfera de centro A (*fig.* 347). Esta esfera es perpendicular en cada uno de sus puntos al campo en este punto, puesto que pasa por A. La esfera es una superficie equipotencial del campo creado por A.

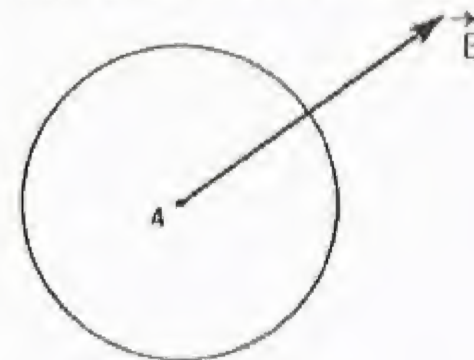


Fig. 347



Fig. 348

Consideremos dos superficies equipotenciales S y S′ (*fig.* 348). Sean sus potenciales respectivos V y V′. Si $V' < V$, el campo eléctrico está dirigido, como ya se ha visto, en el sentido de los potenciales decrecientes. Las líneas de fuerza van, por consiguiente, desde la superficie S a la superficie S′.

Unidad de diferencia de potencial. — La fórmula

$$T = q\ (V_B - V_C)$$

permite definir la unidad de diferencia de potencial.

La unidad electrostática C.G.S. de diferencia de potencial es la diferencia de potencial que existe entre dos puntos tales que cuando se desplace de uno a otro una carga eléctrica unitaria, el trabajo de las fuerzas electrostáticas valga 1 ergio.

La unidad práctica M.K.S.A. es el *voltio*, que es la diferencia de potencial que existe entre dos puntos tales que cuando una carga de 1 culombio se desplace del uno al otro, las fuerzas electrostáticas realicen el trabajo de 1 joule.

El culombio vale 3.10^9 unidades electrostáticas, el joule, 10^7 ergios; el voltio vale, por consiguiente, $\frac{1}{300}$ de unidad electrostática.

Flujo electrostático. — Sea una superficie infinitamente pequeña dS, que rodea un punto O (*fig.* 349). Sea E el campo eléctrico en el punto O, ON la normal a la superficie dS.

Se denomina *flujo electrostático* del campo E a través de la superficie dS la cantidad algebraica

$$d\varphi = E \cdot dS \cdot \cos \alpha,$$

en donde α es el ángulo que forma el campo con la recta ON. El signo de esta cantidad depende evidentemente del sentido que se escoja al trazar la recta ON. Este sentido es, por consiguiente, arbitrario. Consideremos ahora una superficie cualquiera y descompongámosla en elementos muy pequeños; a través de cada uno de estos elementos se tendrá flujos $\Delta\varphi_1$, $\Delta\varphi_2$, etc. Se denominará flujo a través de

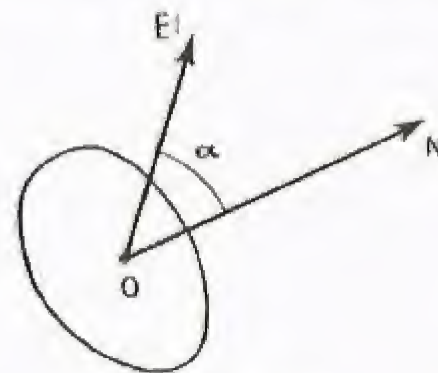


Fig. 349

la superficie completa la suma algebraica de estos flujos $\Delta\varphi_1$, $\Delta\varphi_2$, etc. Será necesario, evidentemente, tomar un sentido conveniente para trazar las normales. Es decir, que una vez escogido un primer sentido, se deducirán los restantes por continuidad. Ejemplo: si la superficie es cerrada, se dirigirán todas las rectas hacia su exterior (*fig.* 350).

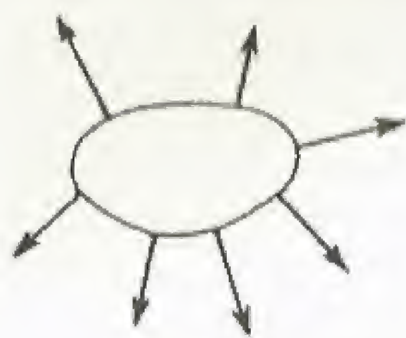


Fig. 350

Observación. Si el campo eléctrico E puede considerarse como la suma de los campos E_1, E_2, etc., se podrá, para calcular el flujo del campo E a través de una superficie, sumar el flujo de los campos E_1, E_2, etc., a través de esta superficie.

Propiedades del flujo electrostático. Teorema de Gauss. — El flujo electrostático posee propiedades muy interesantes; nos limitaremos simplemente a enunciarlas.

Dada una superficie S limitada por una curva Γ (*fig.* 351), el flujo a través de esta superficie depende sólo de la curva Γ y en manera alguna de su forma S. Esta propiedad se expresa diciendo que el *flujo electrostático es conservativo.*

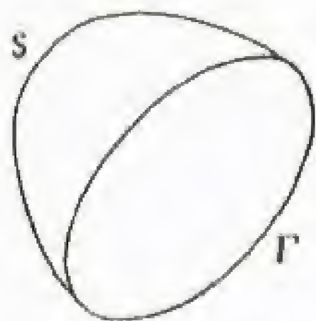


Fig. 351

Un teorema importante, denominado *teorema de Gauss*, es el siguiente:

El flujo que sale de una superficie cerrada en cuyo interior no existe ninguna carga es nulo.

El flujo que sale de una superficie cerrada en cuyo interior existen cargas es igual al producto de la suma algebraica de estas cargas por

$$\frac{4\pi}{\epsilon} \quad (\pi = 3{,}14159...).$$

Observación. En lo dicho hasta ahora se supone que no existen cargas eléctricas en la superficie a través de la cual se calcula el flujo. Debería decirse en rigor: *en toda región en la que no existen cargas eléctricas, el flujo electrostático es conservativo.* El cálculo pone de manifiesto que siempre que el flujo es conservativo el potencial carece de máximo o de mínimo.

Tubos de fuerza. — Sea una curva C cerrada, situada en un campo eléctrico. Tracemos por cada punto C de esta curva la línea de fuerza que pasa por el mismo, con lo que quedará constituido una especie de tubo, denominado *tubo de fuerza* (*fig.* 352). Limitemos este tubo de fuerza por otra curva C', con lo que obtendremos una superficie cerrada. Supongamos que no contiene carga eléctrica; el flujo que atraviesa la superficie total es nulo. Ahora bien: el flujo que atraviesa las paredes del tubo de fuerza es nulo, por ser el campo tangente a estas paredes (cos α = 0). Por lo tanto, los flujos a través de las superficies limitadas por C y C' son iguales y de signos contrarios, pero las normales correspondientes N y N' se han dirigido en sentido inverso, puesto que se han tomado hacia el exterior de la superficie cerrada. Tomemos el mismo sentido para las normales a las superficies limitadas por C y C', o sea N y N'', y se llegará al resultado siguiente: los flujos a través de todas las secciones de un tubo de fuerza son iguales. Dicho de otra forma, en un tubo de fuerza, el flujo se conserva: de ahí la expresión *flujo conservativo.*

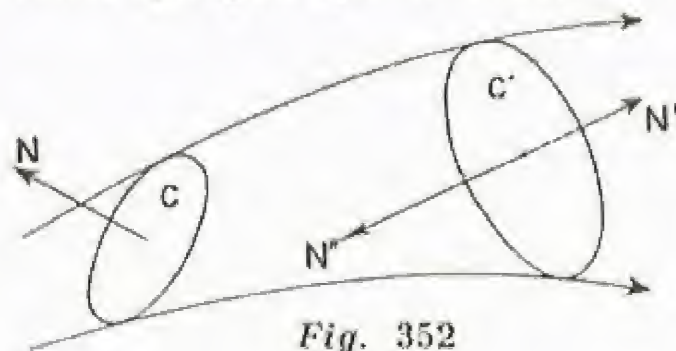


Fig. 352

Definición y propiedades del campo newtoniano. — Se denomina *campo newtoniano* un campo creado por una o varias masas puntuales (masas gravitatorias, eléctricas o de otro tipo), tal que el campo creado por cada una de ellas satisfaga la ley de Coulomb. El campo eléctrico es, por consiguiente, un campo newtoniano. Todo campo newtoniano posee las propiedades siguientes:

1º Deriva de un potencial;

2º El flujo que sale de una superficie cerrada es igual al producto de las masas contenidas en su interior por $\frac{4\pi}{\epsilon}$;

3º El flujo de un campo newtoniano es conservativo en todo punto del espacio donde no existe carga activa, y recíprocamente;

4º Se ha admitido que en toda región en la que no existe carga activa alguna, el potencial no presenta máximos ni mínimos.

Al estudiar el magnetismo, tendremos ocasión de encontrar nuevamente un campo newtoniano, que poseerá, evidentemente, todas estas propiedades.

Propiedades de los conductores en equilibrio eléctrico. Presión electrostática. Cilindro de Faraday

Campo en el interior de un conductor macizo. — Se ha definido un conductor como un cuerpo tal que una carga eléctrica no puede permanecer en él en equilibrio si no actúa sobre la misma ninguna fuerza. Consideremos un conductor macizo; con arreglo al principio de conservación de la electricidad, existen siempre cargas en el interior de este conductor. Puesto que estas cargas están en equilibrio, no están sometidas a ninguna fuerza. *El campo en el interior de un conductor macizo, electrizado o no, en equilibrio eléctrico, es nulo.* Se entiende por equilibrio eléctrico que las cargas que lleva el conductor se han distribuido de tal forma que no efectúan ningún desplazamiento, a menos que se ejerza sobre las mismas una acción exterior.

Consideremos una superficie cerrada (*fig.* 353) trazada en el conductor. El flujo a través de esta superficie es nulo, puesto que el campo es nulo. Ahora bien, este flujo es proporcional a la suma algebraica de las cargas contenidas en el interior de la superficie S, y por consiguiente no existe en dicho interior S ninguna carga. Como S es una superficie cualquiera, no existirá, por lo tanto, ninguna carga libre en el interior de un conductor macizo. Dicho de otra forma, la carga de un conductor macizo electrizado está distribuida solamente en su superficie con una densidad σ.

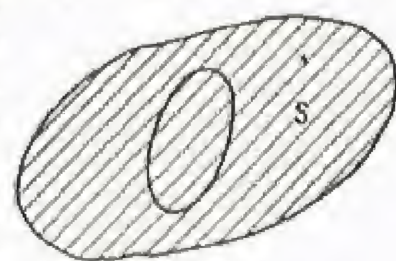


Fig. 353

Campo en el espacio próximo de la superficie de un conductor. — En el espacio próximo de la superficie de un conductor, el campo vale $\frac{4\pi}{\epsilon}\,\sigma$ y es normal a la superficie. En efecto, si no lo fuera, este campo tendría un componente tangente a la superficie, por la cual se desplazarían las cargas situadas en el conductor. Como el campo es normal a la superficie del conductor, este conductor será una superficie equipotencial. El potencial es constante en la superficie de un conductor en equilibrio. ¿Cuál será el potencial en su interior? Como el campo es nulo, el potencial es constante, y su valor es el valor del potencial en la superficie del conductor. Un conductor en equilibrio es, por consiguiente, un *volumen equipotencial.*

Presión electrostática. — Consideremos un elemento muy pequeño AB de la superficie de un conductor, situado en el campo creado por toda la superficie de un conductor diferente de AB. Si designamos por σ la *densidad eléctrica* en B, es decir, la cantidad de electricidad por unidad de superficie, se pone de manifiesto que el campo creado en AB por toda la superficie de un conductor que no sea AB tiene como valor $\frac{2\pi}{\epsilon}\,\sigma$. Sea, entonces, *s* la superficie de AB; este elemento lleva una carga σ*s* que estará sometida a una fuerza normal a la superficie del conductor y cuyo valor será

$$\frac{2\pi}{\epsilon}\,\sigma \cdot \sigma s = \frac{2\pi}{\epsilon}\,\sigma^2 s.$$

La fuerza por unidad de superficie, o *presión electrostática*, tiene como valor $\frac{2\pi}{\epsilon}\,\sigma^2$, y está siempre dirigida hacia el exterior de la superficie.

Esta presión electrostática puede ponerse en evidencia experimentalmente: llenemos de agua un vaso de vidrio (*fig.* 354) en el que se colocará un densímetro, y anotemos la división que indica este último; electricemos después el agua del vaso y el densímetro por medio de una máquina electrostática. El densímetro se eleva, puesto que las cargas electrostáticas que contiene están sometidas a la presión electrostática debida a las cargas de la superficie del agua.

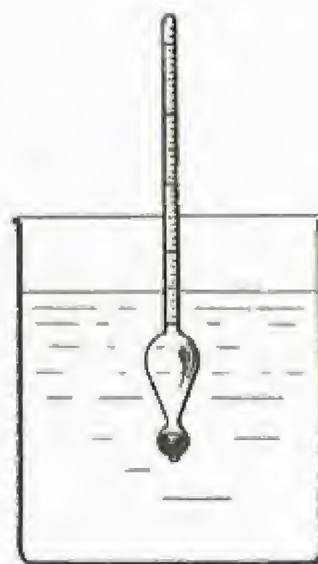


Fig. 354

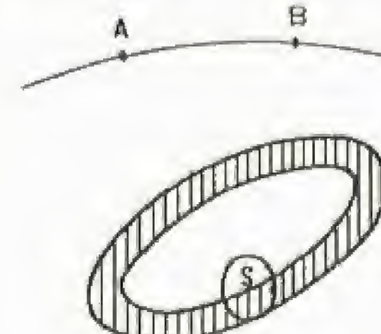


Fig. 355

Campo en el interior de un conductor hueco. — Consideremos un conductor hueco. Las cargas eléctricas no podrán mantenerse en equilibrio más que si todo el volumen del conductor tiene el mismo potencial (*fig.* 355). La superficie interior del conductor —así como su superficie exterior— es una superficie equipotencial. En la cavidad hueca del interior del conductor no existen cargas libres, por lo que el potencial no presenta en ella máximos ni mínimos; es constante, y su valor es el valor constante del potencial del conductor. Al ser el potencial constante en todo el espacio limitado por la superficie exterior del conductor, el campo en él será nulo. Consideremos entonces una superficie S cerrada, trazada en parte en el conductor y en parte en la cavidad. El flujo a través de S es nulo, puesto que el campo es nulo, y no existe ninguna carga en el interior de S. Por consiguiente, en la superficie interna de un conductor hueco no puede haber electricidad.

Esta consecuencia importante, deducida de la ley de Coulomb, es susceptible de verificación. Tomemos una esfera metálica S (*fig.* 356), hueca, soportada por un pie aislante y que tiene una abertura que puede cerrarse con una tapadera C. Unamos esta tapadera, por medio de un hilo de seda, a otra esfera metálica B que pueda penetrar dentro de la esfera S. Electricemos esta esfera S; si ponemos en contacto la superficie exterior de S con B, esta última se electriza.

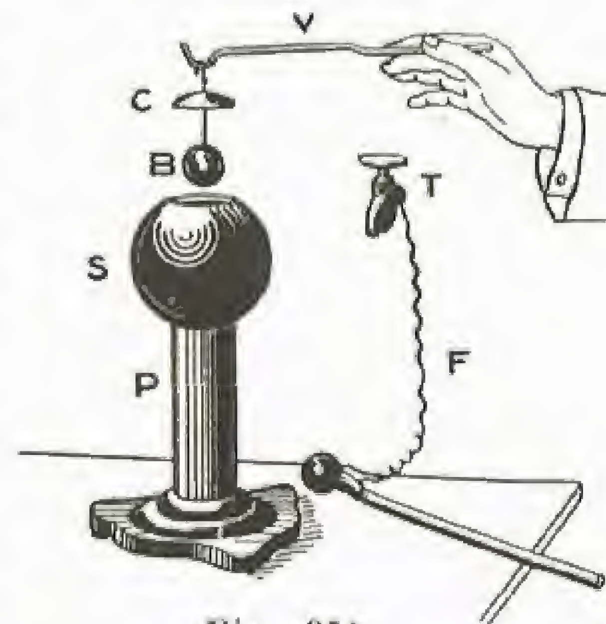


Fig. 356

Si al contrario, tomando la tapadera C con un mango aislante, se introduce B en S, cerrando la abertura con la tapadera y poniendo en contacto B y C, inclinando el pie de esta última, se comprobará, al retirar la esfera B, que no presenta ningún índice de electrización.

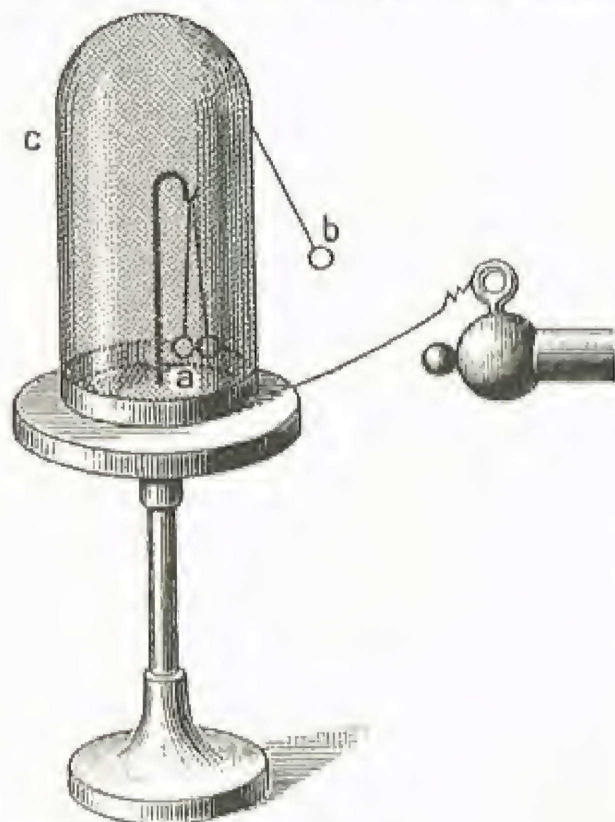


Fig. 357

Una experiencia todavía más sugestiva es la siguiente: una pantalla metálica C (*fig.* 357) está provista de péndulos eléctricos interiores y exteriores. Si la electrizamos, muy intensamente incluso, sólo divergirán los péndulos exteriores, lo que demuestra que la electricidad se ha distribuido únicamente por la superficie exterior de la pantalla. Esta experiencia nos mostrará, además, que no es necesario que el conductor hueco esté completamente cerrado para que subsista la propiedad; basta con que las aberturas sean pequeñas.

La propiedad de esta pantalla, denominada *pantalla de Faraday*, se aplica a la protección de los edificios contra el rayo, envolviéndolos en un entramado metálico que se une al suelo.

Cilindro de Faraday. — Vemos, por lo que antecede, que es posible pasar por completo la carga de un conductor cualquiera a otro conductor hueco, lo que nos permitirá medir las cargas eléctricas. Para ello, coloquemos, sobre el platillo de un electroscopio de panes de oro, un cilindro metálico hueco, abierto por uno de sus extremos, pero lo bastante largo para que esta abertura pueda considerarse como despreciable: tenemos el denominado cilindro de Faraday (*fig.* 358).

Hemos construido un conductor hueco. Llevemos dentro del cilindro un conductor electrizado C, de carga q, sostenido por una varilla aislante, y pongámoslo en contacto con el cilindro: toda la carga q se transporta al cilindro, y las láminas de oro divergen.

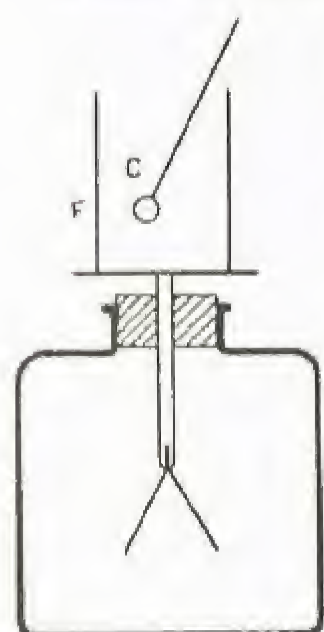


Fig. 358

Anotemos la divergencia d del electroscopio y acerquemos una nueva carga $2q$. La divergencia del electroscopio será d_2, etc. De esta forma hemos graduado el electroscopio y el cilindro de Faraday, que permitirá hacer medidas relativas de las cargas eléctricas.

El cilindro de Faraday permitirá una verificación —sólo aproximada— del principio de conservación de la electricidad. Para ello, coloquemos dentro del cilindro una piel de gato y una varilla de ebonita y frotemos esta última con la piel de gato sin sacarla del cilindro. Las láminas de oro no se separan. Si retiramos la varilla de ebonita, las láminas divergen, y si la volvemos a introducir, las láminas vuelven a caer. Esto muestra claramente que la carga total contenida por la piel de gato y la varilla de ebonita es nula.

Distribución de la electricidad a lo largo de un conductor. Poder de las puntas. — Sabemos que la electricidad se distribuye a lo largo de un conductor de forma que el campo en su interior es nulo. Si por consiguiente se conoce la carga —o el potencial— y la forma del conductor, podrá determinarse, mediante el cálculo, la distribución de la electricidad en la superficie del conductor. Estos cálculos, ya delicados para conductores de formas sencillas, se hacen extremadamente difíciles para formas complejas, por lo cual sólo indicaremos sus resultados, que muestran que la electricidad se distribuye uniformemente por una esfera, es decir, que la densidad eléctrica es la misma en cada punto. Si se toma, en cambio, un conductor alargado (elipsoide), como el que indica la figura 359, se encuentra una densidad eléctrica mayor en los puntos A y A' que en los puntos B o B'.

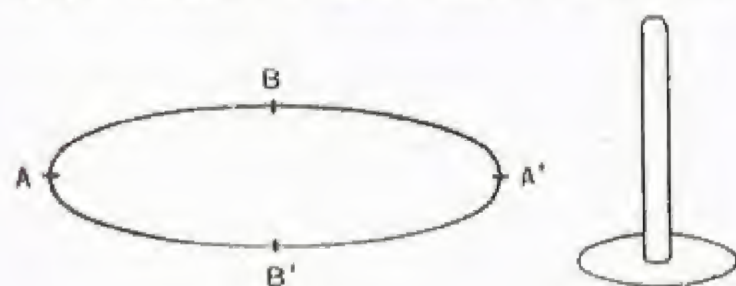


Fig. 359


Fig. 360

Tales resultados pueden verificarse por la experiencia. Para ello se utiliza un aparato pequeño denominado *plano de prueba* (*fig.* 360), compuesto por un disco pequeño de metal montado en la extremidad de una varilla aisladora. Este plano de prueba se aplica al punto de la superficie que se estudia: adquiere una carga proporcional a la densidad eléctrica del punto de contacto. Se le transporta al cilindro de Faraday, con lo que se obtiene una medida de la carga adquirida por el plano de prueba.

De esta forma pueden compararse las densidades eléctricas en los diversos puntos de una superficie. Los resultados obtenidos están de acuerdo con el cálculo.

Si el conductor presenta una punta, la densidad eléctrica en ella adquiere valores muy grandes (y por consiguiente la presión electrostática) y la electricidad puede escaparse por ella.

Colocando la mano delante de la punta se siente una corriente de aire: es el "viento eléctrico", que puede ser lo suficientemente fuerte para apagar una vela. En la obscuridad, el fenómeno es luminoso, percibiéndose en la extremidad de una punta cargada positivamente una flechita luminosa. Cuando la punta está cargada negativamente se percibe solamente un punto. El conjunto de estos fenómenos se conoce bajo el nombre de *poder de las puntas*, y ha encontrado una aplicación en los pararrayos.

Influencia eléctrica. Pantallas eléctricas. Capacidad. Condensadores

Influencia eléctrica. — Sea un conductor aislado A (*fig.* 361) no electrizado y aproximémosle un conductor B cargado, por ejemplo, positivamente. El cuerpo A se encuentra situado en un campo eléctrico y las cargas que en él se encuentran van a desplazarse. Las cargas positivas se alejarán de B, mientras que las cargas negativas se aproximarán.

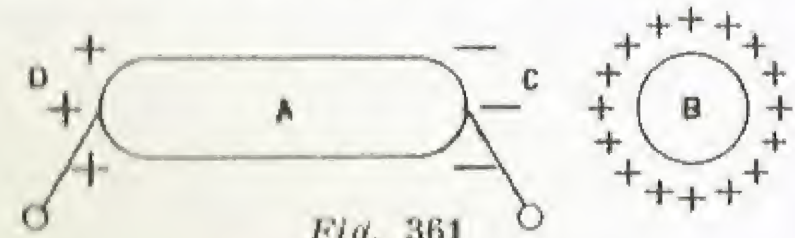


Fig. 361

La carga total de A era nula y lo sigue siendo: ha aparecido la misma electricidad de un signo que de otro, fenómeno conocido con el nombre de influencia. Puede ponerse en evidencia colocando en C y D dos péndulos eléctricos, que divergirán cuando se aproxime B y volverán a caer cuando se aleje. Si tocamos A con el dedo, la electricidad positiva rechazada por B se transmite al suelo y el péndulo B vuelve a caer. Al quitar el dedo, la electricidad negativa se transmite por toda la superficie de A y el péndulo D diverge de nuevo, mientras que el péndulo C diverge algo menos. Si retiramos el cuerpo B, la carga negativa de A se mantiene: hemos cargado A de electricidad negativa por influencia.

Teorema de los elementos correspondientes. — Consideremos una superficie EF (*fig.* 362) en el cuerpo que influye sobre B y

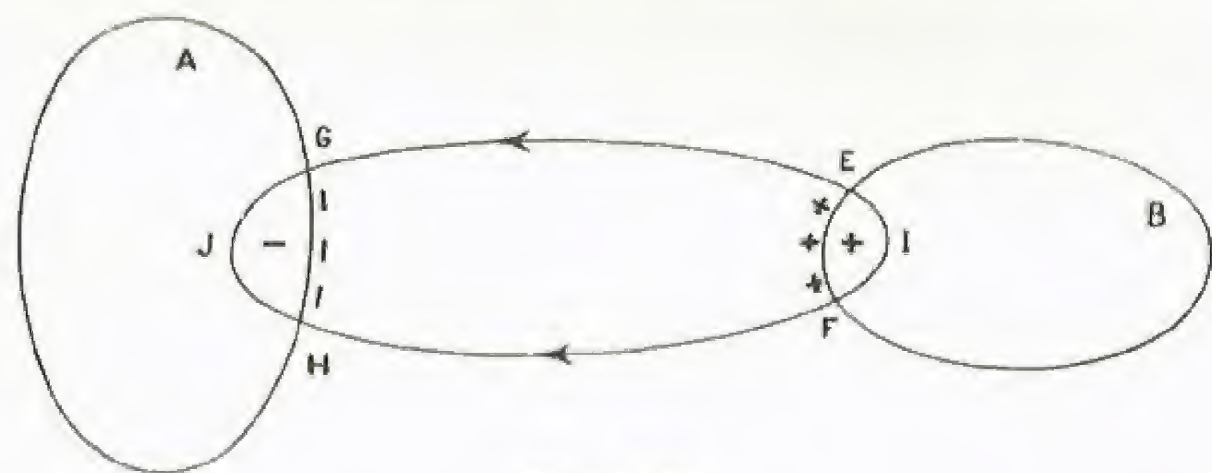


Fig. 362

tracemos el tubo de fuerza que se apoya en el contorno de EF: este tubo determina sobre A una superficie GH. Notemos de paso que las líneas de fuerza son normales simultáneamente a A y B, y van de B a A: en efecto, una carga positiva sería rechazada por B y atraída por A y, por consiguiente, iría de B hacia A. Cerremos el tubo de fuerza por medio de dos superficies EIF y GJH trazadas respectivamente en B y A. El flujo a través de la superficie cerrada EIFHJG es nulo. En efecto, el flujo a través de las paredes del tubo de fuerza es nulo, como también lo es el flujo de las superficies GPH y EIF, puesto que el campo es nulo tanto en el interior de A como en el interior de B.

Teniendo en cuenta que en el interior de la superficie se encuentra la carga q de EF y la carga q' de GH, el flujo a través de la superficie EIFHJG valdrá, por consiguiente,

$$\frac{4\pi}{\varepsilon}(q + q').$$

Al ser nulo, se tendrá

$$q' = -q.$$

Se dice que los elementos de superficie GH y EF son correspondientes. De aquí el TEOREMA: *Las cargas de elementos correspondientes son iguales y de signos contrarios.*

Influencia total. — Supongamos que el cuerpo A sobre el cual se ejerce la influencia rodea completamente el cuerpo B (*fig.* 363): entonces se pueden hacer corresponder dos a dos los elementos de A y de B, puesto que la carga negativa de A es igual en valor absoluto a la de B. Si tocamos A con el dedo y retiramos después B, la carga negativa adquirida por A será igual en valor absoluto a la de B y entonces se dice que se ha realizado una influencia total.

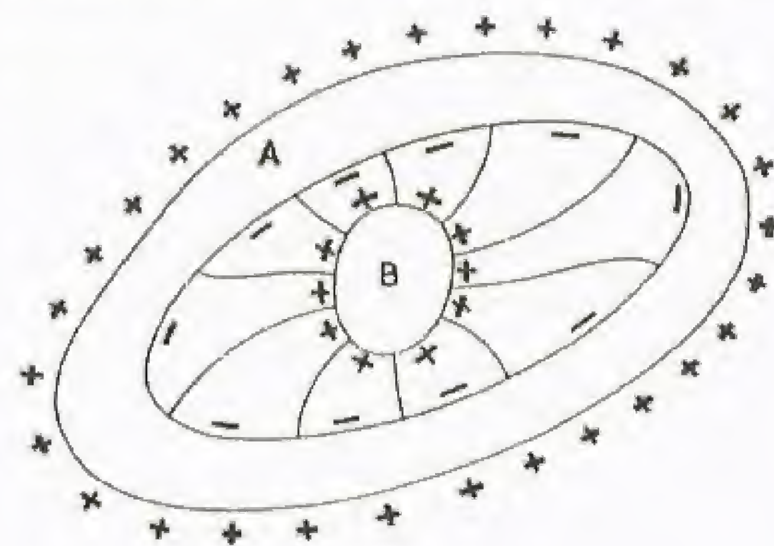


Fig. 363

Aplicación al cilindro de Faraday. — Esto puede verificarse fácilmente con el cilindro de Faraday. Introduzcamos en el cilindro F situado en el platillo de un electroscopio (*fig.* 358) un cuerpo C de carga q, pero sin establecer contacto entre C y el cilindro. Podrá comprobarse:

1° que si el cuerpo C se ha introducido suficientemente, la desviación del electroscopio ya no depende de la posición de C. Esta desviación mide la carga q' de la superficie exterior del cilindro;

2° que si establecemos el contacto entre C y el cilindro, la desviación no varía. Ahora bien, sucede que en estas condiciones el cilindro adquiere la carga q. Por consiguiente, $q' = q$;

3° que si en lugar de establecer el contacto tocamos con el dedo el cilindro y retiramos después C, el cilindro adquiere en estas condiciones la carga $-q'$; se comprueba entonces que la desviación sigue siendo la misma que antes, de donde se deduce un método para medir las cargas: basta con introducir la carga que se desea medir en el cilindro, tocar el cilindro con el dedo y retirar la carga. La desviación del electroscopio previamente graduado da la medida de la carga. La ventaja de este método es que la carga que hay que medir permanece inalterable y puede servir para otra experiencia.

Atracción de los cuerpos ligeros. — El fenómeno de influencia nos va a permitir explicar la atracción de los cuerpos ligeros por los cuerpos electrizados. Consideremos para ello un péndulo eléctrico P (*fig.* 364) y aproximemos al mismo un cuerpo A electrizado positivamente; éste desarrolla sobre P, por influencia, cargas negativas y positivas iguales en valor absoluto, pero las cargas positivas de P están más alejadas de A que las cargas negativas, de forma que el péndulo P es atraído por A. Si tocamos P con el dedo, las cargas positivas se comunican al suelo, y si retiramos el dedo, el péndulo P será entonces atraído con mucha más fuerza que en el primer caso. También se puede hacer la experiencia con dos péndulos, uno suspendido a un hilo de seda, el otro a un hilo de cobre; de estos dos péndulos, el segundo se desviará más fuertemente cuando se le aproxime un cuerpo electrizado.

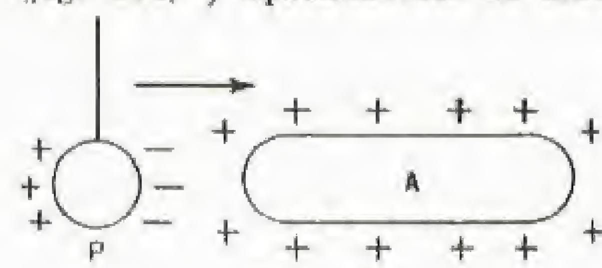


Fig. 364

Pantallas eléctricas. — Hemos visto que en el interior de un conductor hueco A el campo es nulo, cualquiera que sea el número, la electrización y la posición de los conductores situados alrededor de A. El conductor A desempeña el papel de una pantalla eléctrica, en el sentido de que los fenómenos eléctricos que se desarrollan en el interior de A son independientes de los fenómenos eléctricos en el exterior de A. La recíproca es también cierta, es decir, que los fenómenos en el exterior de A son independientes de los fenómenos en el interior de A, si A se mantiene a un potencial constante. Prácticamente, puede mantenerse A a un potencial constante uniéndolo con el suelo.

Esta recíproca se pone de manifiesto mediante la siguiente experiencia: sea un cilindro de Faraday unido al suelo (*fig.* 365); introduzcamos dentro del cilindro un cuerpo electrizado C y aproximemos a dicho cilindro un péndulo P: éste no se desvía. Si se suprime la comunicación del cilindro con el suelo, el péndulo P se desvía (*fig.* 366). Esta proposición y su recíproca constituyen el teorema de las pantalles eléctricas.


Fig. 365

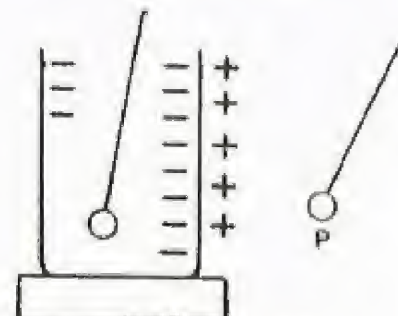


Fig. 366

Teorema de las pantallas eléctricas. — Este teorema es de gran importancia práctica. Para hacer medidas precisas, se rodean los aparatos de medida y los cuerpos que sirven para estas medidas con una envoltura conductora conectada a tierra. De esta forma, las influencias exteriores son nulas. No es indispensable que dicha envoltura conductora sea continua; basta con que no presente sino aberturas pequeñas, pero es necesario que todas las partes de la envoltura estén conectadas a tierra.

Capacidad. — Comuniquemos una carga Q_1 a un conductor aislado, que adquirirá entonces un potencial V_1. Comuniquemos al mismo conductor una carga Q_2, siendo V_2 el potencial que adquirirá entonces, etc. El cálculo demuestra que

$$\frac{Q_1}{V_1} = \frac{Q_2}{V_2},$$

es decir, que entre la carga de un conductor aislado y su potencial existe una relación constante. El valor de esta relación se denomina capacidad del conductor, y se designa por la letra C. Se tendrá la relación

$$C = \frac{Q}{V} \text{ o } Q = CV.$$

Unidad de capacidad. — *La unidad de capacidad es la capacidad de un conductor que, aislado en el espacio, tiene un potencial igual a la unidad cuando su carga es también igual a la unidad.* En el sistema práctico, la unidad se denomina "*faradio*", *y es la capacidad de un conductor que, con un potencial de un voltio, posee una carga de un culombio.*

El voltio vale $\frac{1}{300}$ de unidad electrostática C.G.S.; el culombio vale 3.10 unidades electrostáticas C.G.S. El faradio valdrá 9.10^{11} unidades electrostáticas C.G.S. Esta unidad es demasiado grande, por lo cual se utiliza el *microfaradio* (μF), que vale una millonésima de faradio, y el *picofaradio* (PF), que vale una millonésima de μF.

Coeficiente de influencia. — Consideremos dos conductores A y B (*fig.* 367), que se mantienen, respectivamente, a los potenciales constantes V_1 y V_2. Como consecuencia de los fenómenos de influencia, A y B no toman las cargas $C_A V_1$, $C_B V_2$; C_A y C_B son las capacidades de A y de B cuando están aislados, pero con cargas diferentes Q_1 y Q_2. Se demuestra que

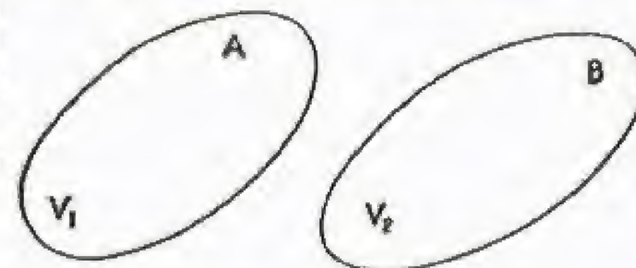


Fig. 367

$$Q_2 = C_2V_2 + C'_2V_1$$
$$Q_1 = C_1V_1 + C'_1V_2.$$

Los coeficientes C_1, C_2, C'_1, C'_2 sólo dependen de las formas y de las posiciones respectivas de los conductores A y B, siempre que los potenciales V_1 y V_2, que son, por otra parte, potenciales cualesquiera, se mantengan constantes. Se demuestra, además, que $C'_1 = C'_2$.

Al coeficiente C_1 (o C_2) se le denomina *capacidad* de A (o de B) en presencia de B (o de A).

El coeficiente C'_1, igual a C'_2, se llama *coeficiente de influencia mutua* entre A y B.

Es importante señalar que C_1, capacidad de A en presencia de B, es diferente de la capacidad C_A del conductor A aislado. Supongamos que se mantiene B al potencial 0 y que el potencial V_1 de A es positivo (*fig.* 368), es decir, que A esté cargado positivamente; tracemos las líneas de fuerza del campo creado por A; estas líneas van de los potenciales superiores a los potenciales inferiores, y por consiguiente de A a B.

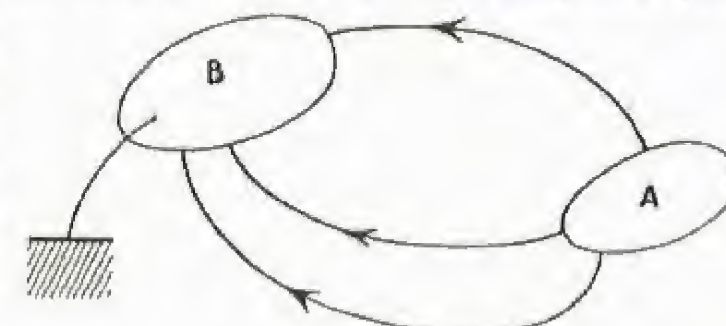


Fig. 368

La carga que adquiere B es negativa. Ahora bien, tenemos

$$Q_1 = C_1V_1 + C'_1\,0,$$
$$Q_2 = C_2 0 + C'_1 \times V_1,$$

o bien, $Q_1 = C_1V_1$, $Q_2 = C'_1V_1$. Como V_1 es positivo, C_1 es positivo y C'_1 es negativo. Una capacidad es, por consiguiente, una magnitud positiva, y un coeficiente de influencia, una magnitud negativa.

Cálculo del coeficiente de influencia en el caso de la influencia total. — Supongamos que B rodee A (*fig.* 369) y esté en comunicación con el suelo. Sea V_1 el potencial de A. Tendremos, como en el caso anterior,

$$Q_1 = C_1V_1,$$
$$Q_2 = C'_1V_1,$$

pero como la influencia es total, se tendrá:

$$Q_2 = -Q_1,$$

y por consiguiente $C'_1 = -C_1$.

El coeficiente de influencia mutua de dos conductores, en el caso de la influencia total, es igual y de signo contrario a la capacidad del conductor interior.

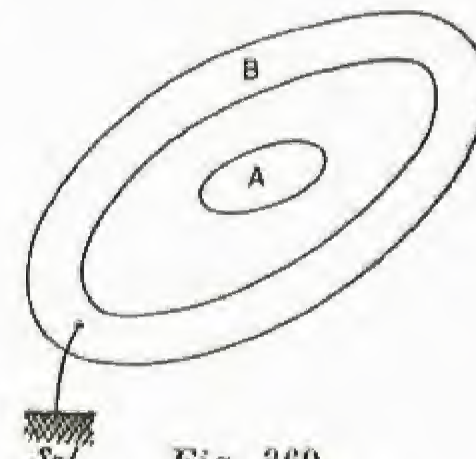


Fig. 369

Ya se ha demostrado en el caso en que el conductor exterior esté al potencial 0, pero sabemos que el coeficiente de influencia no depende de los potenciales ni de las cargas.

Condensadores. — Continuemos el estudio del caso en que el conductor B rodee completamente A. El aparato así formado (*fig.* 370) se denomina *condensador*. A es la armadura interna, y B la armadura externa. Sean V_1 y V_2 los potenciales de A y B, y Q_1 y Q_2 sus cargas:

$$Q_1 = C_1V_1 + C'_1V_2,$$
$$Q_2 = C_2V_2 + C'_2V_1;$$

se tiene $C'_1 = C'_2 = -C_1$; hagamos $C_1 = C$, y obtendremos

$$Q_1 = CV_1 - CV_2 = C(V_1 - V_2),$$
$$Q_2 = C_2V_2 - CV_1 = C_2V_2 - CV_1 + CV_2 - CV_2,$$

o bien $Q_2 = -C(V_1 - V_2) + V_2(C_2 - C)$.

Haciendo $C_2 - C = C'$, se tendrá:

$$Q_1 = C(V_1 - V_2),$$
$$Q_2 = -C(V_1 - V_2) + C'V_2.$$

Sabemos que la carga que tiene la superficie interna de B es igual y de signo contrario a la de A, y por consiguiente la carga $C'V_2$ es la carga que tiene la superficie externa de B. En general, esta última carga es pequeña, por lo que no la tendremos en cuenta, y llamaremos carga de condensador a la cantidad $Q_1 = C(V_1 - V_2)$ y capacidad de condensador a la cantidad C.

Estos resultados siguen siendo válidos cuando el cuerpo B no rodea completamente A, siempre que las aberturas sean suficientemente pequeñas. Por ejemplo, podrán tomarse dos cilindros concéntricos (*fig.* 371) cuyas longitudes sean muy grandes con respecto a sus diá-

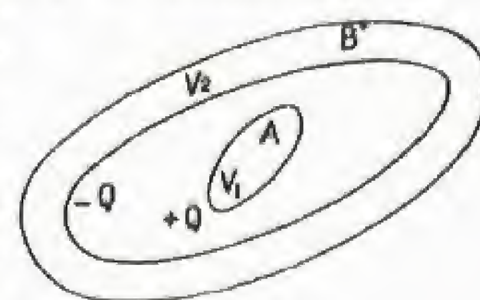
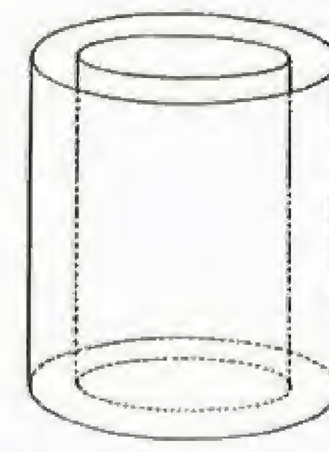


Fig. 370


Fig. 371

metros, o también dos planos paralelos cuya distancia entre sí sea pequeña con respecto a sus dimensiones.
Este último condensador, muy utilizado por su comodidad, se denomina *condensador plano.*
Si S es la superficie de los planos conductores paralelos, situados uno enfrente de otro, y *e* la distancia entre ambos, se demuestra que la capacidad del condensador es dada por la fórmula

$$C = \frac{\varepsilon \cdot S}{4 \pi e}.$$

La capacidad será tanto más grande cuanto menor sea *e*. Si se alejan las armaduras, manteniendo constante la diferencia de potencial entre ellas, la carga disminuye, y si se aproximan, aumenta; si la distancia llega a ser muy pequeña, la carga puede llegar a ser muy grande: se ha condensado la electricidad en el condensador.

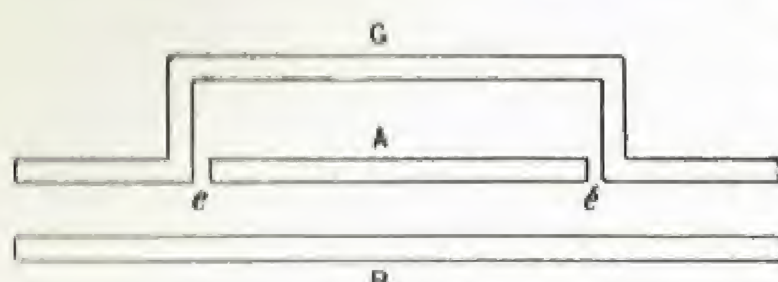


Fig. 372

Cuando se trata de experiencias muy precisas, no pueden despreciarse las aberturas del condensador plano, y es necesario hacer correcciones. Para evitar esta dificultad se utiliza el denominado anillo de guardia. Este dispositivo puede observarse con suficiente claridad en la figura 372. G. es el *anillo de guardia.* Las aberturas *e, e´* son muy pequeñas, En estas condiciones, si S es la superficie de A, su carga *total* será

$$Q = \frac{\varepsilon \cdot S \cdot V}{4 \pi e}.$$

Dieléctricos y rigidez eléctrica. — El medio que separa las dos armaduras se denomina *dieléctrico* del condensador y puede ser el vacío. Si en vez del vacío se emplea un aislador cualquiera, como el vidrio, se aumenta la capacidad del condensador.
Un estudio experimental de este fenómeno muestra que el coeficiente ε, y por consiguiente la capacidad, es multiplicado por un coeficiente que no depende más que de la naturaleza del dieléctrico empleado. Este coeficiente ha recibido el nombre de poder inductor específico, constante dieléctrica o permitividad relativa del dieléctrico considerado. Así, cuando se dice que la ebonita tiene por constante dieléctrica 2,8 se quiere decir que un condensador plano en el cual el intervalo entre las armaduras está enteramente lleno por la ebonita tiene una capacidad

$$C = 2{,}8 \cdot \frac{S}{4\pi e}.$$

A continuación se indican unos cuantos valores de la constante dieléctrica de algunos aisladores usuales:
Parafina, 2,25; vidrio, 5 a 7; mica, 8; gutapercha 4,4; aire, 1,000576.
De aquí el interés que presenta utilizar un dieléctrico que no sea el vacío o el aire; por ello, en los condensadores usuales se encuentra como dieléctrico el vidrio, la mica, el papel parafinado, etc.
Algunos cuerpos tienen poderes inductores específicos excepcionalmente elevados, como el tartrato doble de sodio y potasio, cuya constante dieléctrica llega a 2 000, el óxido de titanio ($Ti\ O_2$), con una constante de 120, y el titanio de bario, cuyo poder inductor específico pasa por un máximo superior a 5 000 para una temperatura de 120° C. Estas propiedades excepcionales son análogas a las que poseen los cuerpos ferromagnéticos en magnetismo; recientemente descubiertas, estas substancias encuentran ya numerosas aplicaciones.
Al escoger un dieléctrico se tiene en cuenta otra cualidad: la rigidez eléctrica.
Cuando se establece una diferencia de potencial entre las armaduras de un condensador, puede suceder que estalle una chispa entre estas dos armaduras, atravesando el dieléctrico, lo que evidentemente deteriora el condensador. La diferencia de potencial necesaria para producir la chispa, o diferencia de potencial explosiva, depende de la naturaleza del dieléctrico y de su espesor. Se llama rigidez eléctrica de un dieléctrico la diferencia de potencial explosiva que corresponde a un centímetro del dieléctrico. Esta diferencia de potencial explosivo no es proporcional al espesor del dieléctrico, pero puede admitirse en primera aproximación y, en particular, para la construcción de un condensador.
He aquí algunos valores del potencial explosivo, en millares de voltios por centímetro:
Aire seco: 32; petróleo: 65; vidrio: 75 a 303; papel: 40 a 100; mica: 600 a 750.


Fig. 373

Condensadores usuales. — El primer condensador utilizado fue la botella de Leyden (*fig.* 373), que es una botella de vidrio sobre cuyas partes interna y externa se pegan hojas de estaño. Estas hojas de estaño constituyen las armaduras, y la propia botella el dieléctrico. La botella de Leyden apenas se emplea ya para los usos industriales, pues el vidrio es un mal dieléctrico, porque nunca es homogéneo, y se producen, por tanto, rupturas. Se utilizan sobre todo condensadores constituidos por bandas de estaño separadas por papel impregnado de parafina (*fig.* 374). Se obtienen así unas especies de cintas que pueden arrollarse de forma que ocupen menos volumen. También se emplea como dieléctrico la mica, pero esta materia es muy cara. Los condensadores de referencia están constituidos por hojas de mica plateadas por sus dos caras.
Los condensadores electroquímicos se obtienen con una hoja de aluminio sobre la cual se deposita, por electrólisis, una capa muy delgada —dos milésimas de milímetro como máximo— de alúmina. Arrollando estas hojas llegan a obtenerse capacidades importantes con volúmenes muy pequeños.

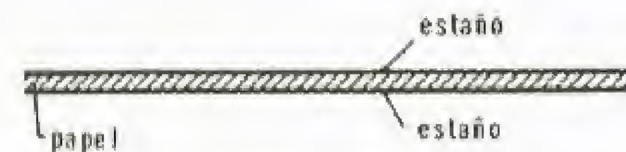


Fig. 374


Fig. 375

Los condensadores cerámicos tienen como dieléctrico cerámica de titanato de bario o de óxido de titanio. Indiquemos finalmente que para las medidas de gran precisión se utilizan los condensadores de aire (*fig.* 375).

Calentamiento dieléctrico. — El dieléctrico de un condensador se calienta, sobre todo cuando se aplica a las armaduras una diferencia de potencial que cambia de sentido varias veces por segundo (corriente alterna). Este calentamiento puede ser considerable, y se han construido hornos de "pérdidas dieléctricas" para la fusión de los cuerpos no conductores, el vidrio, por ejemplo.

Asociación de condensadores. — Es frecuente en la práctica utilizar, en vez de un condensador aislado, un sistema de condensadores, a fin de obtener una capacidad superior o inferior a la de que se dispone. El sistema así formado se denomina batería de condensadores, que se constituye mediante dos tipos fundamentales de asociación: asociación en paralelo, representada esquemáticamente por la figura 376, y asociación en serie, representada por la figura 377. Cualquiera otra forma de asociación no es más que una combinación de las anteriores.

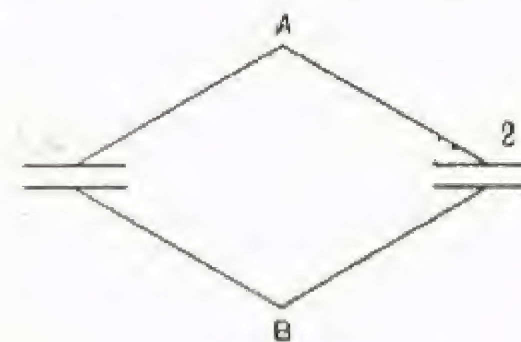


Fig. 376



Fig. 377

En la asociación en paralelo, cada condensador tiene la misma diferencia de potencial V, y sus cargas son C_1V, C_2V, etc. La carga total es $C_1V + C_2V + \ldots = V(C_1 + C_2 + \ldots)$, y la capacidad del sistema es, por consiguiente, $C_1 + C_2 + \ldots$, es decir, la suma de las capacidades de los elementos.
En la asociación en serie, dos armaduras, como C y D, forman un solo conductor aislado cuya carga primitiva es nula y que permanecerá nula, puesto que el conductor está aislado. Dicho de otra forma, C adquirirá la carga + Q, por ejemplo, y D la carga — Q. Con arreglo a lo que ya conocemos de los condensadores, A tomará la carga — Q y B la carga + Q. Si C_1 y C_2 son las capacidades de los condensadores AC y DB, V_1 y V_2 las diferencias de potencial entre A y C y D y B, y V la diferencia de potencial entre A y B, se tendrá

$$Q = C_1V_1, \qquad Q = C_2V_2, \qquad V = V_1 + V_2,$$
$$V_1 = \frac{Q}{C_1}, \qquad V_2 = \frac{Q}{C_2},$$

de donde

$$V_1 + V_2 = V = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}.$$

Como la carga del sistema es Q, y V la diferencia de potencial, la capacidad de la asociación será

$$C = \frac{Q}{V};$$

según la última igualdad, se tendrá

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}.$$

La capacidad del sistema formado es tal que su inversa equivale a la suma de las inversas de las capacidades de los condensadores que lo constituyen.
La asociación en paralelo es evidentemente ventajosa, no siéndolo tanto la asociación en serie. Ello se comprende fácilmente si se observa que la diferencia de potencial entre cada armadura no es más que una fracción de la diferencia de potencial total. Se empleará, pues, la asociación en paralelo cuando, disponiendo de una diferencia de potencia dada, se tema que no sea soportada por un condensador único.

Medidas electrostáticas
Energía electrostática
Máquinas electrostáticas

Generalidades. — En la práctica sólo se miden diferencias de potencial, capacidades y cargas. Como entre estas tres magnitudes existe cierto número de relaciones, si se dispone de un aparato que permita medir una de ellas será posible medir las restantes por medio de artificios convenientes. Será, pues, necesario primeramente construir un aparato fundamental que mida directamente ya las diferencias de potencial, ya las capacidades, ya las cargas. Como instrumento de medida fundamental se ha escogido, por múltiples razones, el aparato que mide las diferencias de potencial, que se ha denominado **electrómetro.**

Un electrómetro consta siempre de una parte fija y de una parte móvil, estableciéndose entre ambas la diferencia de potencial que hay que medir. Bajo la influencia de las fuerzas electrostáticas, la parte móvil tiende a desplazarse, oponiéndose a ella una fuerza de origen mecánico. La parte móvil tomará, pues, una posición tal que las dos fuerzas, electrostática y mecánica, sean iguales. La diferencia de potencial se medirá en función del desplazamiento de la parte móvil del electrómetro. Pueden distinguirse tres tipos de electrómetros:

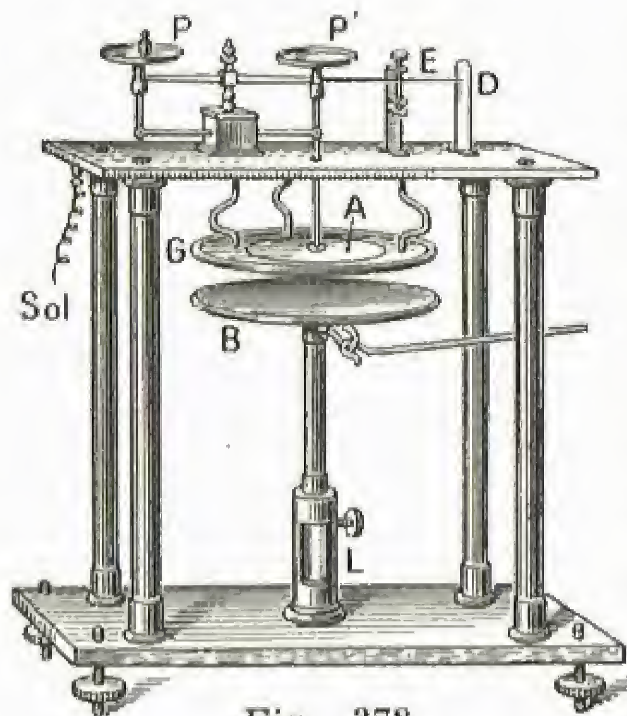


Fig. 378

1º Electrómetros en los cuales puede establecerse una relación matemática rigurosa entre el desplazamiento de la parte móvil y la diferencia de potencial: son los electrómetros absolutos. Con estos aparatos se mide una diferencia de potencial efectuando una medición de longitud (desplazamiento de la parte móvil), o una medida de fuerza (la fuerza mecánica opuesta);

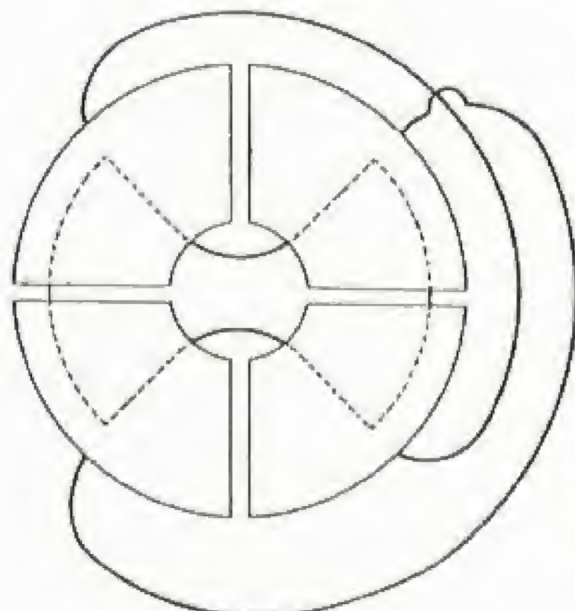
2º Electrómetros en los cuales el desplazamiento es proporcional a las diferencias de potencial o a sus cuadrados, sin que pueda calcularse rigurosamente el coeficiente de proporcionalidad. Estos aparatos permiten medir el cociente de dos diferencias de potencial, y por consiguiente medir una diferencia de potencial, si se dispone de una diferencia de potencial patrón;

3º Electrómetros en los cuales se desconoce la relación entre el desplazamiento y la diferencia de potencial. Estos aparatos podrán, no obstante, utilizarse ya después de una graduación previa, ya para verificar que una diferencia de potencial es nula.

Estudiaremos sucesivamente estos tres tipos de electrómetros.

Electrómetro absoluto de lord Kelvin. — Este aparato, cuyo principio se debe a lord Kelvin, consiste en un condensador plano (*figura* 378), una de cuyas armaduras B puede desplazarse paralelamente a sí misma mediante un tornillo micrométrico L, mientras que la otra, A, está suspendida de uno de los brazos P' de una balanza. En el otro brazo P se colocan pesos hasta obtener el equilibrio. La fuerza de atracción que existe entre las dos armaduras de un condensador plano es $\frac{SV^2}{8\pi e^2}$, en donde S es la superficie de una armadura, V la diferencia de potencial y e la distancia entre las armaduras. Si p es el peso utilizado, se tendrá

$$\frac{SV^2}{8\pi e^2} = p, \quad \text{o} \quad V = e\sqrt{\frac{8\pi p}{S}}$$


Fig. 379

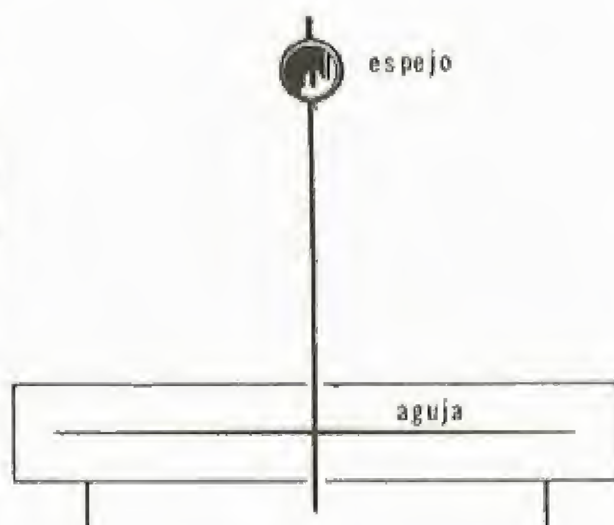


Fig. 380

Electrómetro de cuadrantes. — Este electrómetro es del segundo tipo. La parte móvil (*fig.* 379) es la aguja, que tiene la forma de dos sectores circulares opuestos por el vértice y que está situada entre dos círculos conductores de planos paralelos (*fig.* 380). Cada círculo está dividido en cuatro cuadrantes por estrechas ranuras, comunicando cada uno de los cuadrantes eléctricamente con el cuadrante inferior y con el cuadrante opuesto. Se tienen, por consiguiente, tres conductores en presencia: la aguja y dos grupos de cuatro cuadrantes. La aguja está suspendida de un hilo largo y fino de torsión pequeña, aunque no despreciable, midiendo su rotación un espejo solidario de la misma. Todo el aparato está rodeado por una envoltura metálica que desempeña el papel de pantalla eléctrica; esta envoltura está naturalmente conectada a tierra.

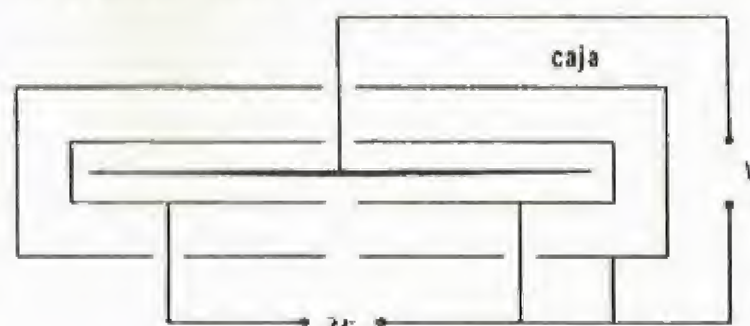


Fig. 381

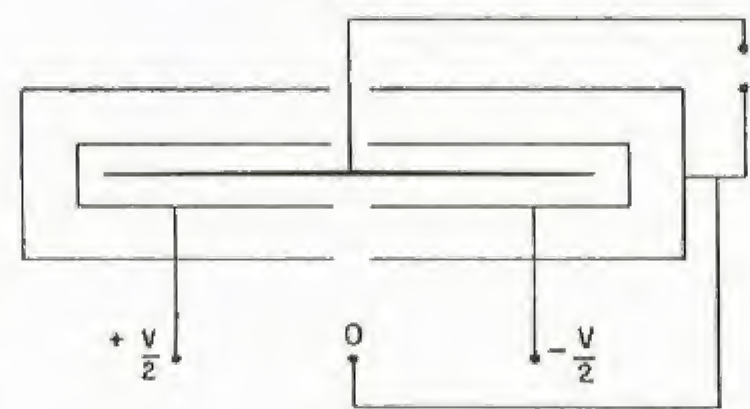


Fig. 382

Puede montarse este aparato de varias maneras. Las dos más corrientes utilizan una diferencia de potencial auxiliar V; son montajes *heterostáticos*, representados esquemáticamente en las figuras 381 y 382, en las cuales la diferencia de potencial que hay que medir es la diferencia v. En la primera, la diferencia de potencial auxiliar V se establece entre la aguja y la caja, que está reunida a un grupo de cuadrantes. La diferencia de potencial que hay que medir es la que existe entre los dos grupos de cuadrantes. Si v es pequeña con respecto a V, las desviaciones son proporcionales a v. Lo mismo sucede en el segundo montaje, pero entonces ya no es necesario que v sea pequeña con respecto a V. Con este aparato llega a apreciarse el milivoltio, e incluso la décima de milivoltio.

La desviación α es dada por la fórmula

$$\alpha = k(V - V')\left(V_0 - \frac{V + V'}{2}\right).$$

V_0 es el potencial de la aguja, V y V' son los potenciales de los dos grupos de cuadrantes, y k una constante.

Electrómetro de panes de oro. — Este electrómetro pertenece al tercer tipo, y ya se ha estudiado bajo el nombre de electroscopio. Para utilizarlo en las medidas de potencial, se establece la diferencia de potencial entre la caja del electrómetro y el conductor que soporta la lámina de oro. La caja debe, por consiguiente, ser conductora, al menos en parte, ya que es necesario dejar aberturas que permitan ver dicha lámina (*fig.* 383). Entonces quedarán indicados los desplazamientos de la lámina sobre una graduación. Obsérvese que la fuerza que se opone a las fuerzas electrostáticas no es más que el peso de la lámina de oro. Cuanto más ligera sea, mayor será la sensibilidad, y de ahí que se utilicen láminas lo más delgadas posible. Las desviaciones son aproximadamente proporcionales a los cuadrados de las diferencias de potencial. Con este aparato sólo pueden apreciarse diferencias de potencial inferiores a 30 voltios.

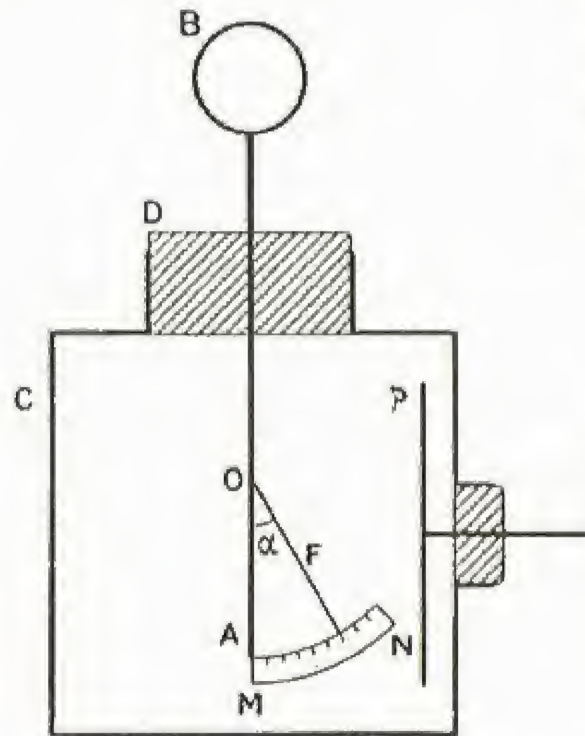


Fig. 383

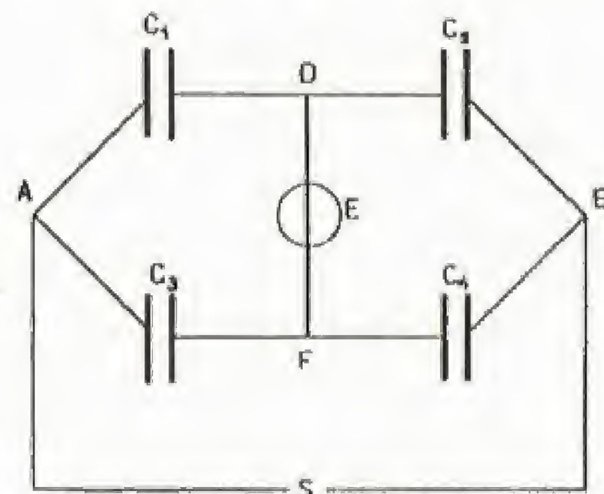


Fig. 384

Procedimientos electrométricos modernos. — Se utilizan las lámparas tríodos. La corriente de placa es proporcional a la diferencia de potencial entre la rejilla y el cátodo, pudiendo evaluarse la diferencia de potencial por una simple medición de corriente. Con lámparas de construcción cuidada puede llegarse de esta forma a una sensibilidad de una millonésima de voltio.

Medidas de capacidades. — Existen diferentes montajes que permiten medir las capacidades. Indicamos a continuación uno de los más sencillos y precisos. Se utiliza el montaje eléctrico anterior (*figura* 384), donde C_1, C_2 y C_3 designan condensadores de capacidades conocidas y variables, C_4 la capacidad desconocida, S una fuente eléctrica cualquiera y E un electrómetro. Sean V_1 y V_2 los potenciales de A y B, y v_1 y v_2 los de D y F. Como los condensadores C_1 y C_2 están asociados en serie, se tendrá

$$C_1(V_1 - v_1) = C_2(v_1 - V_2)$$

y, análogamente,

$$C_3(V_1 - v_2) = C_4(v_2 - V_2).$$

Variemos las capacidades C_1, C_2 y C_3 de forma que $v_1 = v_2$, resultado que se conseguirá cuando el electrómetro permanezca en cero. Dividiendo miembro a miembro las ecuaciones anteriores se tendrá

$$\frac{C_1}{C_3} = \frac{C_2}{C_4},$$

de donde

$$C_4 = C_3 \frac{C_2}{C_1},$$

lo que permite calcular la capacidad desconocida C_4.

De la medida de las capacidades se deduce fácilmente la de las constantes dieléctricas.

Medida de cargas eléctricas. — Ya se ha visto cómo se medían las cargas por medio del cilindro de Faraday: las mediciones precisas se hacen de una manera análoga. El potencial del cilindro de Faraday es una función lineal de su carga, según la propia definición de la capacidad. Bastará entonces medir su potencial, que será proporcional a la carga.

Energía eléctrica. — Supongamos que en un campo eléctrico creado por un sistema cualquiera S colocamos una carga eléctrica q en un punto donde el potencial es V_1 carga que trasladaremos después a un segundo punto de potencial V_2. El trabajo que realizan durante este trayecto las fuerzas electrostáticas es

$$T = q(V_1 - V_2).$$

Si el trabajo es motor o positivo, la energía del sistema S ha disminuido la cantidad T; si, al contrario, el trabajo es resistente, la energía de S ha aumentado la misma cantidad T. Algebraicamente diremos que la cantidad — T representa la variación de energía del sistema S. De esta forma sólo puede definirse una variación de energía, por la misma razón que sólo pueden definirse diferencias de potencial. Ahora bien, por lo mismo que hemos tomado un origen de potenciales (el potencial eléctrico es nulo en todos los puntos situados a una distancia infinita de cualquier carga eléctrica), diremos que la energía de un sistema es medida por el trabajo que puede obtenerse alejando indefinidamente todas las cargas eléctricas del sistema, o, inversamente, el trabajo que hay que proporcionar para llevar a los lugares que ocupan en el sistema S las cargas que se han supuesto al principio a distancias mutuas infinitas. O también, lo que equivale a lo mismo, la energía de un sistema es igual a la cantidad de trabajo producido cuando todas las cargas del sistema descienden al potencial cero.

Energía de un condensador. — Sea un condensador de capacidad C, cuya diferencia de potencial entre sus armaduras es V. Si se unen las armaduras por un hilo conductor (*fig.* 385), las cargas + Q y — Q de ambas armaduras se neutralizan. La carga del conductor único así formado será nula, y por consiguiente también lo será su potencial.

Fig. 385

Las cargas de las armaduras han pasado del potencial V al potencial O; por consiguiente, debe obtenerse en esta experiencia un trabajo igual a la energía eléctrica que poseía el condensador, trabajo que aparece en forma de calor susceptible de medida. De esta medida se deduce la energía del condensador. Riess encontró de esta forma, para la energía de un condensador, la expresión

$$W = \frac{1}{2} CV^2.$$

Este resultado se obtuvo de nuevo mediante cálculo, lo que constituyó una verificación indirecta de la ley de Coulomb.

Máquinas electrostáticas. — Son aparatos capaces de proporcionar en forma continua electricidad a un potencial elevado. Se habían casi relegado a la categoría de objetos de museo, cuando las necesidades de la física nuclear de potenciales elevados y constantes los pusieron de nuevo en boga.

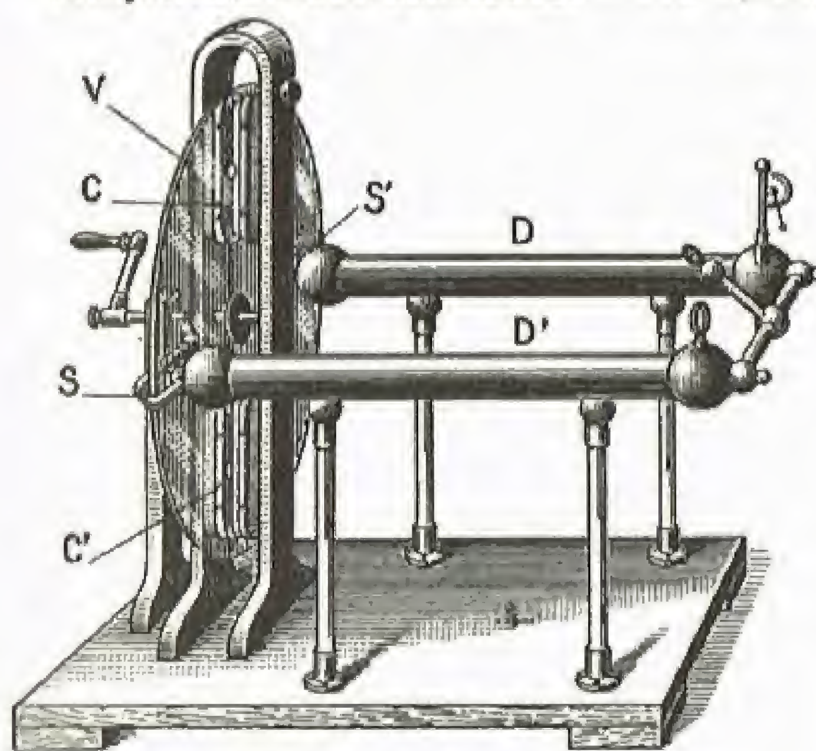


Fig. 386.—Máquina de Ramsden

La producción de electricidad mediante estas máquinas es debida a fenómenos de frotamiento o de influencia. Las máquinas de influencia son las únicas que todavía se utilizan. No obstante, describiremos, por su interés histórico, la *máquina de Ramsden*, que es una máquina de frotamiento.

Esta máquina consta esencialmente, como toda máquina electrostática, de un *productor* de electricidad, constituido en este caso por las escobillas CC' (*fig.* 386), cubiertas de oro macizo; de un *transportador*, el disco de vidrio V, que se electriza al frotar entre las escobillas CC', y de un *colector*, que es el conductor aislado DD', unido a los peines metálicos SS'. El disco de vidrio se carga de electricidad positiva, adquirida por frotamiento, al girar entre las escobillas SS', electricidad que transportada por los peines SS' desarrolla por influencia electricidad positiva en el conductor aislado DD' y electricidad negativa; esta última, al escaparse por las puntas de los peines, reduce al estado neutro el disco de vidrio y el fenómeno se desarrolla como si la carga de este disco pasara al colector.

Máquinas de influencia. La más sencilla de todas es el electróforo (*fig.* 387) Se compone de un disco de parafina P colocado dentro de una caja metálica M, la cual lleva una pieza que sobresale ligeramente de la parafina. Se electriza la parafina, por frotamiento por ejemplo, y se coloca encima un disco metálico P' sostenido por una varilla aisladora. Sobre P' se crean cargas positivas por influencia, transmitiéndose a tierra las correspondientes cargas negativas a causa del contacto de P' con la pieza *c*. Si Q es la carga de P', C su capacidad y V su potencial, se tendrá

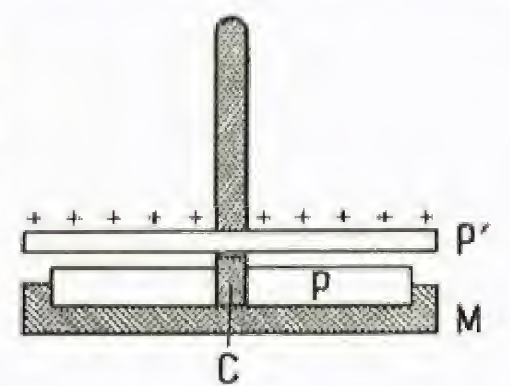


Fig. 387

$$Q = CV.$$

Si se quita el disco P', disminuye su capacidad, puesto que se le aleja de M'; como Q permanece constante, V aumentará. Éste es el principio de todas las máquinas de influencia. Puede utilizarse el disco P' para cargar un cilindro de Faraday, cuyo potencial alcanzará, al cabo de cierto número de operaciones, el potencial máximo adquirido por el disco P' cuando está alejado de M.

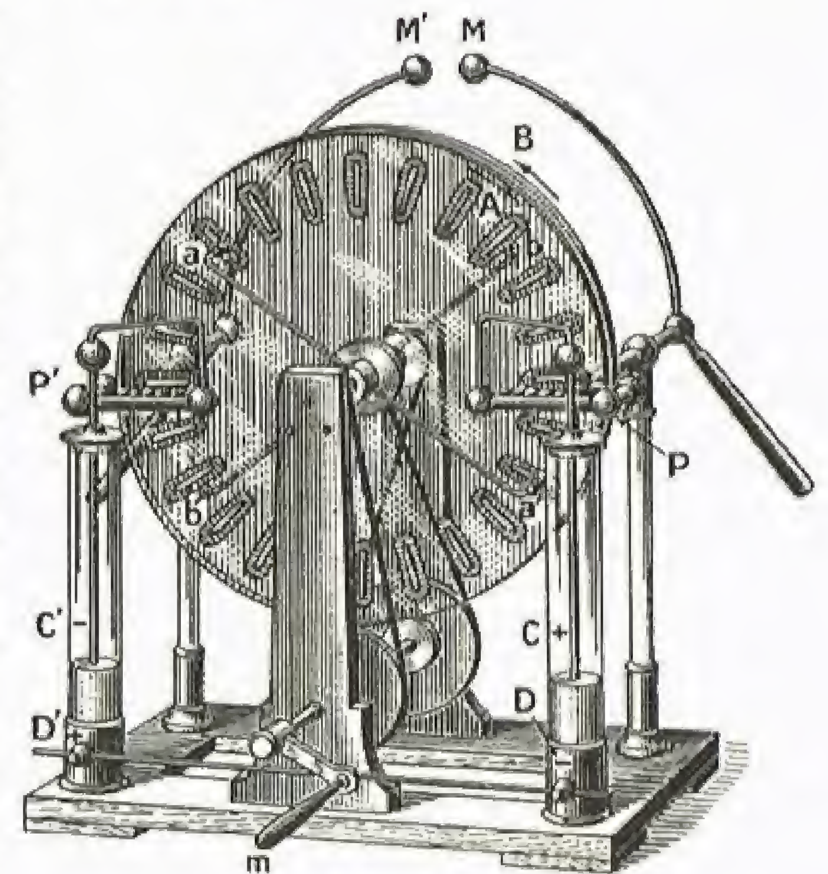
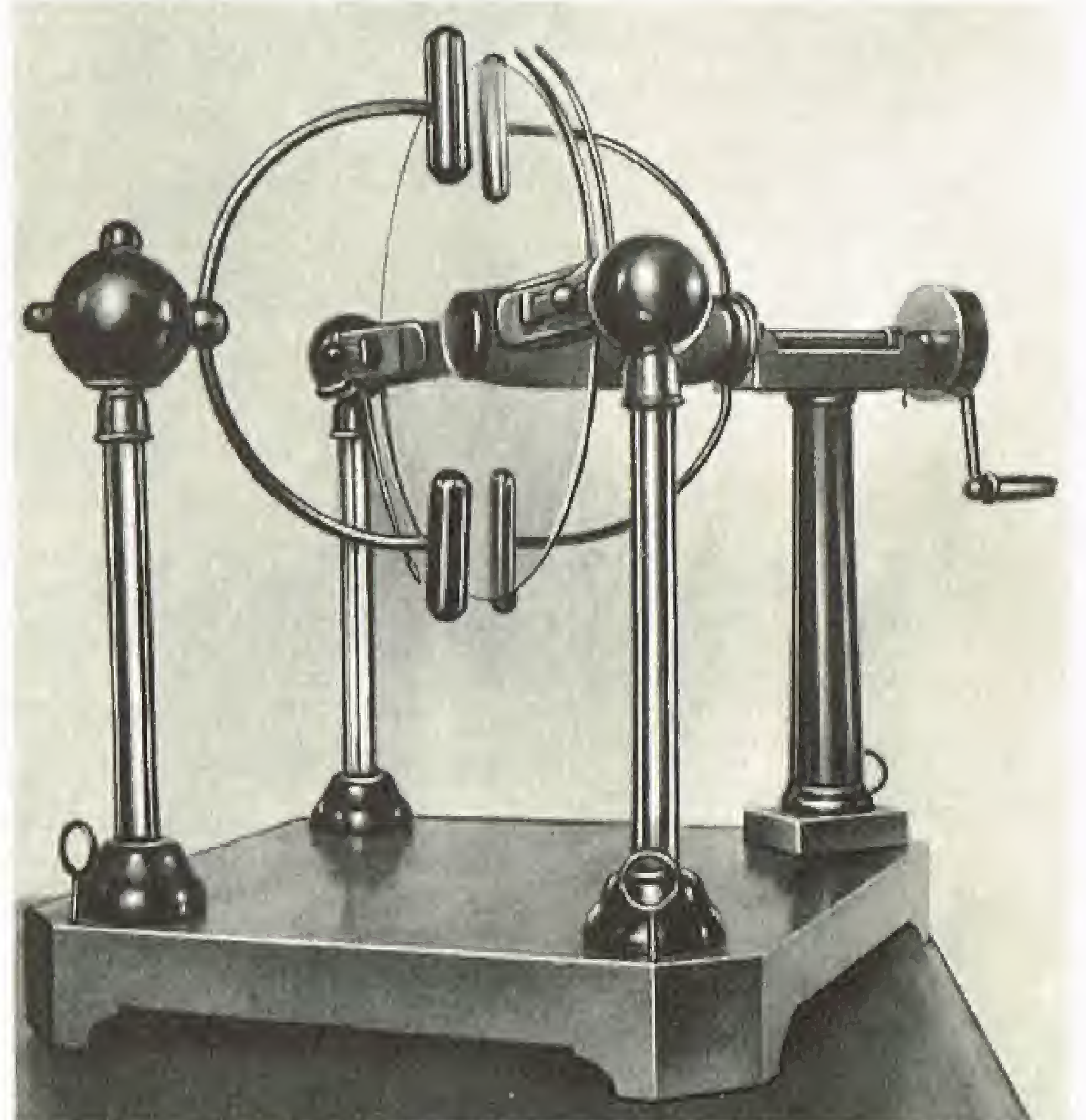


Fig. 388

La *máquina de Wimshurst* (*fig.* 388) consta de dos discos de vidrio o de ebonita A y B, cada uno de ellos con el mismo número par de bandas conductoras, generalmente de papel de estaño. Estos discos son accionados por el mismo árbol *m*, que es arrastrado por medio de poleas y de correas, una de ellas cruzada, lo que permite que los discos giren en sentidos contrarios. Dos conductores, que llevan en sus extremos escobillas metálicas *aa'* y *bb'*, frotan los discos A y B, y los peines metálicos PP' recogen la electricidad transportada por dichos discos y comunican con las armaduras de un condensador CC'.

Si se hacen girar los discos, la influencia del disco A (*fig.* 389) sobre el conductor *bb'* crea en las partes del disco B, situadas bajo sus escobillas, cargas que son positivas en *b* y negativas en *b'*. La influencia del disco B desarrolla en el disco A cargas positivas en *a'* y negativas en *a*. Las cargas son arrastradas por la rotación de los discos y se distribuyen como indica la figura 389, en la cual se han representado, para mayor claridad, los discos A y B por dos círculos desiguales. Los discos se descargan en los peines, como en la máquina de Ramsden. Ambos discos llevan a P electricidad negativa y a P' electricidad positiva.


Máquina eléctrica de discos de vidrio de Van Marum
(Modelo del Conservatorio de Artes y Oficios de París)

Es necesario, evidentemente, cebar la máquina, aunque casi siempre se ceba ella misma, ya que al poner en contacto las esferillas M y M' se comunican eléctricamente los peines P y P'.

Esta máquina puede suministrar una corriente eléctrica del orden de una decena de miliamperios, bajo una tensión de 100 000 voltios.

Máquina de Van de Graaf. Es una máquina de influencia de gran potencia y de potencial elevado, que se utiliza para las necesidades de la física nuclear. Su principio es el siguiente (*fig.* 390): entre dos poleas A y B gira una correa aisladora, que se carga por un peine P unido a una generatriz continua que suministra, por ejemplo, 10 000 voltios. En la parte exterior de la esfera metálica S, concéntrica con la polea A, aparecen, por influencia, cargas del mismo signo, mientras que en la parte inferior se producen cargas de signo contrario. Un peine P permite neutralizar estas últimas por la carga de la correa. Para aumentar el potencial explosivo y el poder inductor específico, todo el aparato está lleno de un gas a presión. Las correas son de algodón engomado o de papel especial. Para aumentar aún más la diferencia de potencial se utilizan, por lo general simultáneamente, dos aparatos semejantes, uno de los cuales tiene su esfera cargada positivamente y el otro negativamente. Con esferas de nueve metros de radio se han alcanzado diez millones de voltios, con una potencia del orden de cincuenta kilowatios.

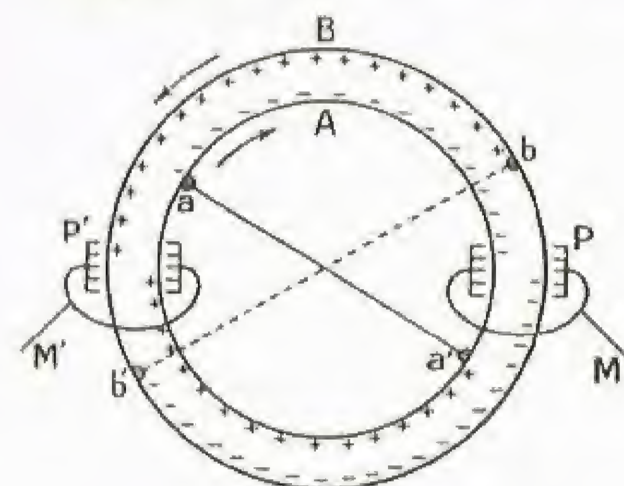


Fig. 389

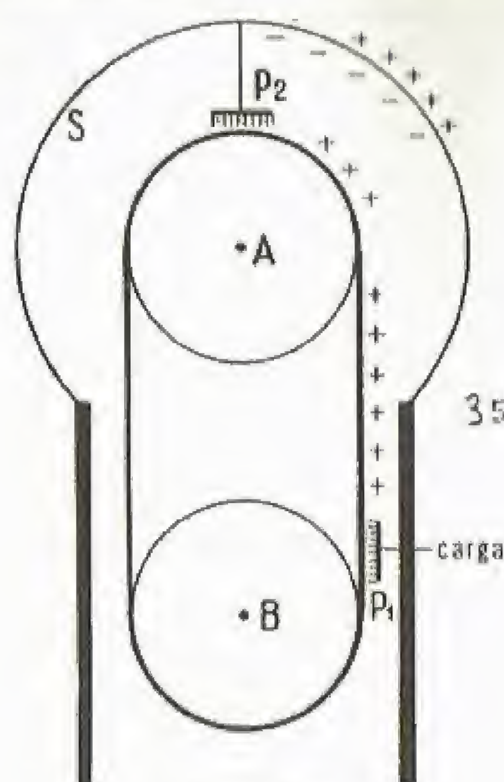
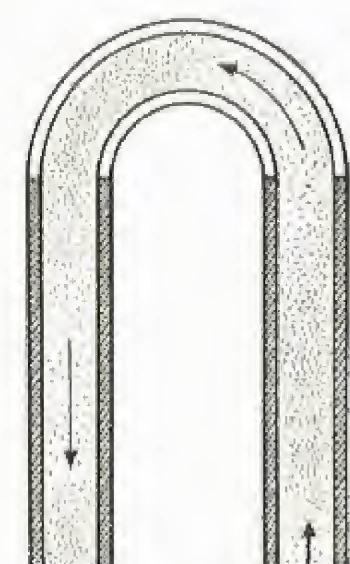


Fig. 390


Fig. 391

Máquina de Pauthenier. Su principio es análogo al de la máquina precedente, substituyéndose la correa por una corriente de polvos electrizados (*fig.* 391) que se descargan en un tubo metálico semicircular, volviendo después al circuito.

Máquina de Grenoble. El estudio teórico de las máquinas de influencia ha permitido a dos físicos franceses, Félici y Morel, construir una máquina electrostática, denominada "máquina de Grenoble", concebida sobre bases lógicas y de gran rendimiento. Esta máquina, representada esquemáticamente en la figura 392, es un electróforo mecanizado. Los sectores fijos M corresponden a la caja metálica del electróforo, y los sectores móviles P al platillo. Unas escobillas B y B' permiten unir estos sectores ya a tierra (función de la pieza *c* del electróforo), ya a la utilización. Los sectores M se cargan por un generador continuo, prescindiéndose de la parafina. Para aumentar el poder inductor específico del aire se comprime éste a treinta atmósferas dentro del aparato. Obsérvese que en esta máquina no hay peines, lo que aumenta el potencial disruptivo. Esta máquina alcanza un rendimiento del 80 por ciento.

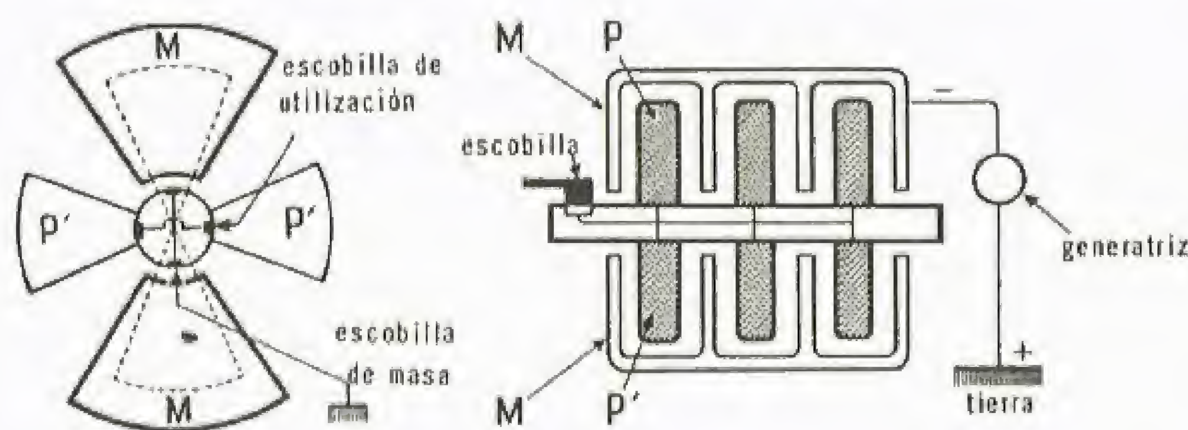


Fig. 392

Origen de la energía eléctrica suministrada por las máquinas. — La energía eléctrica producida por las máquinas se debe a la transformación del trabajo que hay que suministrarles para vencer las fuerzas electrostáticas. Estas fuerzas se oponen, en efecto, al desplazamiento del transportador que, cargado de electricidad de signo contrario al de la electricidad del productor, se aleja de éste y se aproxima al colector cargado de electricidad del mismo signo.

El rendimiento de esta transformación es muy escaso debido a los considerables frotamientos que se originan.

Piezoelectricidad. — Cuando se ejerce una presión o una tracción en la dirección del eje binario (*fig.* 393) de una lámina de cuarzo paralelepipédica, tallada según los ejes del cristal, se producen sobre ambas caras de la lámina cargas eléctricas iguales y de signos contrarios. Estas cargas son proporcionales a la presión o la tracción ejercida. Para un kilogramo por centímetro cuadrado se tiene una carga de 0,062 u.e.s. por centímetro cuadrado. Si la presión se ejerce perpendicularmente al eje del cuarzo y a su eje binario, la carga que se adquiere por una presión de un kg. por centímetro cuadrado es de $0{,}062\ \frac{l}{e}$, en donde *e* es el espesor de la lámina en la dirección del eje binario y *l* la dimensión de esta lámina en la dirección perpendicular al plano definido por el eje binario y el eje del cuarzo (*fig.* 393). Para la talla del cuarzo puede darse el valor que se quiera a la cantidad $\frac{l}{e}$. Prácticamente, se toma *e* muy pequeño y *l* lo mayor posible. Las dos caras de la lámina van provistas de una hoja metálica (*fig.* 394), y la diferencia de potencial entre las dos hojas se mide por pesos diferentes colocados en el platillo P.

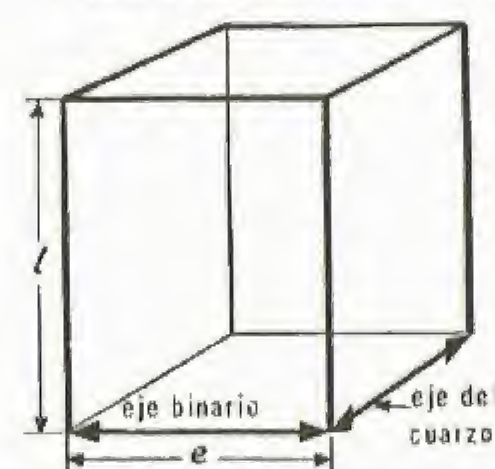


Fig. 393

Inversamente, si se cambian las dos hojas metálicas, el cuarzo se deforma. Utilizando tensiones alternas de alta frecuencia, estas deformaciones siguen esta frecuencia y se producen sonidos de frecuencias muy grandes (ultrasonidos), a los cuales es insensible el oído. El fenómeno de piezoelectricidad no se utiliza para la producción de electricidad, sino para la obtención de ultrasonidos, para transformar las modulaciones de una corriente eléctrica en sonidos audibles (altavoces) o para transformar sonidos audibles en modulaciones eléctricas (micrófonos). También otros cuerpos, además del cuarzo, presentan el fenómeno de la piezoelectricidad; pueden citarse, entre los más importantes, la turmalina, el fosfato de amonio y el titanato de bario.

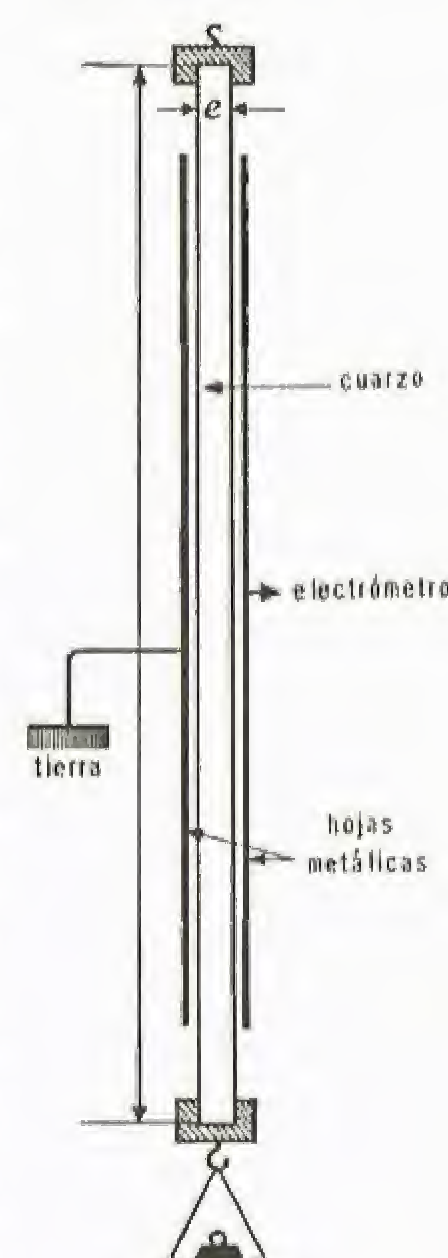


Fig. 394

Magnetismo

Definiciones y leyes fundamentales: Imanes. Polos de los imanes. Las dos clases de polos. Campo y masa magnéticos. Ley de Coulomb. Unidades magnéticas. Líneas de fuerza, tubo de fuerza, potencial y flujo magnéticos. Unidad de flujo magnético. Espectros magnéticos. — **Cálculo de las acciones magnéticas. Momento magnético:** Experiencia del imán seccionado. Doblete magnético. Acción de un campo uniforme sobre un imán. Momento magnético. Momento magnético de un sistema de imanes. Campo creado por un imán pequeño. Posiciones de Gauss. Intensidad de imantación. — **Magnetismo terrestre. Medidas magnéticas:** Campo magnético terrestre. Declinación magnética. Inclinación magnética. Principio de las mediciones magnéticas. Medida de $\frac{M}{H_1}$. Magnetómetro. Medida del producto MH. Causas del magnetismo terrestre. Minas magnéticas

Definiciones y leyes fundamentales

Imanes. Polos de los imanes. — Los imanes son conocidos por todo el mundo; algunos de ellos, llamados "piedra de imán", son naturales, pero los más corrientes son artificiales. Suelen tener por lo general la forma de herradura, de barra o de rombo muy alargado. Veremos más adelante cómo se obtienen estos imanes; por el momento sólo nos ocuparemos de sus propiedades, denominadas *magnéticas*.

Un imán es un cuerpo que atrae los objetos de hierro o de acero, pero esta propiedad no es común a todas las partes del imán, sino que se manifiesta particularmente en ciertos puntos. Por ejemplo, si hacemos rodar una barra imantada entre limaduras de hierro, estas limaduras se adhieren casi solamente a los extremos de la barra (*figura* 395): por consiguiente, en un imán existen puntos determinados en los cuales parece concentrarse la propiedad magnética. Estos puntos se denominan *polos* del imán. Los imanes que vamos a estudiar tienen dos polos, que la experiencia muestra ser el número mínimo de polos.

Ya se ha visto que los polos de una barra imantada están situados en sus extremos, ocurriendo lo mismo con una aguja imantada y con un imán de herradura.

Las dos clases de polos. — Una brújula está constituida, como todos sabemos, por una aguja imantada de forma de rombo muy alargado, móvil alrededor de un eje vertical. Esta aguja se coloca, cuando se la sitúa suficientemente alejada de cualquier masa de hierro, en la dirección norte-sur. Es decir, que uno de los polos de la aguja se vuelve hacia el norte, y el otro hacia el sur (*fig.* 396). Existen, pues, dos clases de polos: designaremos como polo norte el que se dirige hacia al norte y polo sur el otro. Tomemos una barra imantada: si se la suspende de un hilo sin torsión, tendremos una brújula cuyos polos norte y sur determinaremos fácilmente. Aproximemos ahora el polo norte de un imán al polo norte de una brújula: observaremos que este último es rechazado. Si aproximamos, en cambio, el polo sur del imán, el polo norte de la brújula es atraído. Esto nos proporciona un nuevo medio de determinar la naturaleza de los polos. Operando con imanes de toda clase, incluso con imanes que tengan más de dos polos, se comprobará que sólo existen dos clases de polos magnéticos: los que son rechazados por el polo norte de un imán y los que son atraídos por dicho polo. En definitiva, se llega a las conclusiones siguientes:



Fig. 395



Fig. 396

1º *Sólo existen dos clases de polos magnéticos;*

2º *Dos polos del mismo nombre se repelen, y dos polos de nombres distintos se atraen.*

Campo y masa magnéticos. — Las nociones de masa magnética y de campo magnético (v. Electricidad estática, pág. 107) se deducen directamente de la existencia de fuerzas magnéticas en el espacio próximo de un imán. Diremos que el polo P_1 de un imán es repelido por el polo P_2 de otro imán a causa de que este último crea un campo magnético $\vec{H}$ en el punto P_1, y porque el polo P_1 posee una masa magnética m. La fuerza de repulsión $\vec{F}$, el campo $\vec{H}$ y la masa magnética m están ligados por la relación *vectorial*

$$\vec{F} = m \cdot \vec{H}.$$

Distinguiremos dos clases de masas magnéticas: las masas positivas o norte, que corresponden a los polos norte, y las masas negativas o sur, que corresponden a los polos sur.

Ley de Coulomb. — Esta ley, establecida por Coulomb para explicar la acción mutua de dos masas magnéticas, es la siguiente:

Dos masas magnéticas puntuales se atraen o se repelen en razón inversa del cuadrado de su distancia.

Las experiencias que condujeron al establecimiento de esta ley se consideran hoy demasiado poco precisas para que constituyan una demostración, por lo cual consideraremos la ley de Coulomb como un principio cuyo valor quedará establecido por las verificaciones, con frecuencia muy precisas, de algunas de sus consecuencias.

Por consideraciones análogas a las expuestas en electrostática (v. página 108), se encontraría para la expresión de la fuerza f que dos masas magnéticas m y m' ejercen una sobre otra la atracción expresada por la fórmula

$$\vec{f} = k \frac{mm'}{r^2},$$

en donde r es la distancia entre las dos masas y k una constante que sólo depende de las unidades elegidas.

Unidades magnéticas. — Las fórmulas $\vec{f} = k \dfrac{mm'}{r^2}$ y $\vec{F} = m\vec{H}$ permiten definir las unidades magnéticas.

La unidad de masa magnética es la masa magnética que colocada en el vacío a 1 cm de una masa magnética idéntica es repelida con una fuerza de una dina. Esta es la unidad C. G. S. de masa magnética.

Con esta unidad, la constante k de la fórmula

$$f = k \frac{mm'}{r^2}$$

es igual a 1 para el vacío.

La unidad de campo magnético es el campo que ejerce sobre una masa magnética igual a la unidad una fuerza de una dina. Esta unidad se ha denominado *oersted* (también se dice, impropiamente, *gauss*).

Líneas de fuerza, tubo de fuerza, potencial y flujo magnéticos. — Estas expresiones pueden definirse de la misma forma que en electrostática (v. págs. 108, 109 y 110).

Con arreglo a la ley de Coulomb, se observa que el campo magnético es un campo newtoniano, y por consiguiente:

a) deriva de un potencial;

b el flujo magnético que sale de una superficie cerrada es igual al producto por 4π de las masas magnéticas contenidas en su interior;

c) el flujo magnético es conservativo en todo el punto del espacio donde no existen masas magnéticas;

d) en toda región donde no existen masas magnéticas, el potencial no puede presentar máximo ni mínimo.

Unidad de flujo magnético. — *La unidad de flujo magnético es el flujo que atraviesa una superficie de 1 cm² colocada en el vacío normalmente a un campo uniforme de un oersted.* Esta unidad se ha denominado *maxwell.*

La unidad M.K.S.A. es el weber, que vale 10^8 maxwells.

Espectros magnéticos. — Las líneas de fuerza de un campo magnético pueden fácilmente ponerse en evidencia. Coloquemos para ello un imán sobre una mesa horizontalmente, cubriéndolo con una hoja de cartón bien rígido. Salpiquemos, después el cartón con limaduras de hierro, y demos ligeros golpes: observaremos que los granos de la limadura se disponen en líneas regulares, que son las líneas de fuerza del campo creado por el imán. Se dice entonces que se ha creado un *espectro magnético.* Las figuras 397 y 398 representan los espectros magnéticos de un imán recto y de un imán en herradura. Estas líneas van del polo norte al polo sur, lo que significa que una masa magnética norte que pueda desplazarse libremente describirá una línea de fuerza que se aleja del polo norte y se aproxima al polo sur. En el espacio situado entre los dos brazos del imán, las líneas de fuerza son paralelas, lo que indica que en dicho espacio el campo es uniforme, es decir, de magnitud, sentido y dirección constantes.



Fig. 397

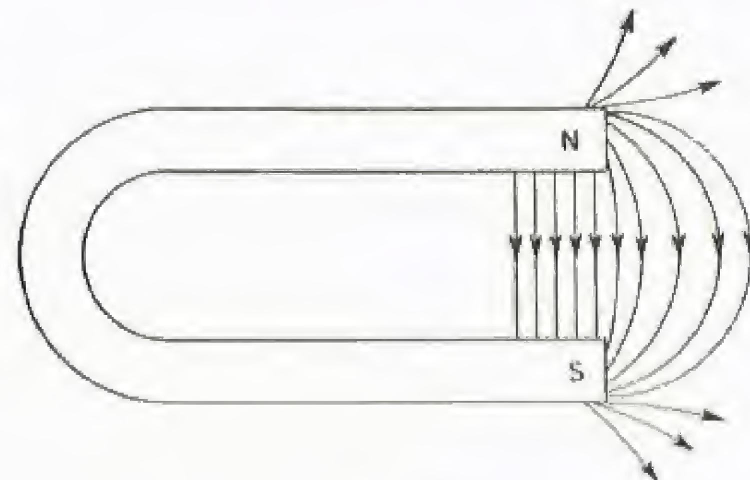


Fig. 398

Cálculo de las acciones magnéticas Momento magnético

Experiencia del imán seccionado. Doblete magnético. — El estudio del magnetismo se ha proseguido hasta ahora en estrecha analogía con el de la electrostática, pero esta analogía no es completa. En el magnetismo no se han definido, como en electrostática, conductores y aisladores. Tampoco veremos nunca cuerpos que contengan únicamente masas magnéticas norte o masas magnéticas sur, análogamente a como en electrostática existen cuerpos cargados, unos de electricidad positiva, otros de electricidad negativa. Parece sencillo aislar los dos polos de un imán dividiéndolo en dos trozos: si procedemos a esta experiencia (*fig.* 399), comprobaremos que los dos pedazos del imán primitivo siguen siendo imanes, con un polo norte y un polo sur. Por mucho que continuemos dividiendo la materia imantada, jamás llegaremos a aislar un polo único. Como la división podría llegar teóricamente hasta el átomo, se llega a la conclusión de que el átomo de la materia imantada es un imán de dos polos.

En electrostática hemos enunciado una ley de conservación de la electricidad; no existe lo mismo en magnetismo; pero si medimos las masas magnéticas de los dos polos de un imán, comprobaremos que son

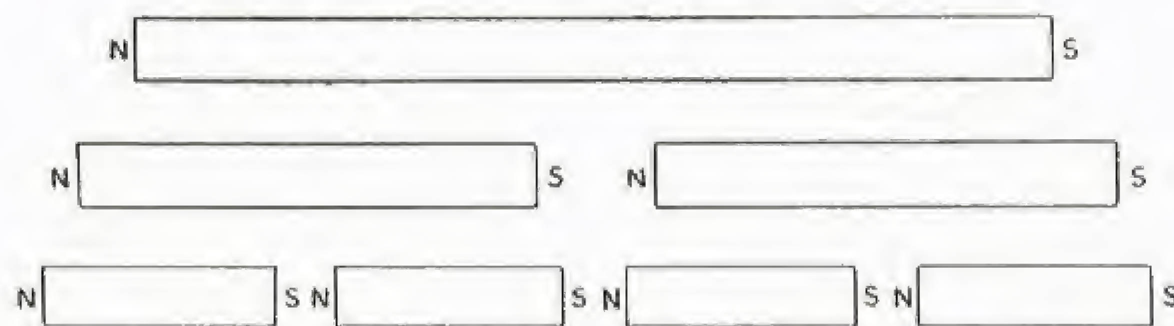


Fig. 399.—Imán seccionado

iguales en valor absoluto, cualquiera que sea el imán considerado. Podemos, pues, enunciar la siguiente ley:

Ley. *La masa magnética total de un imán es nula.*

Esta ley se cumple también para el átomo de la substancia imantada, puesto que este átomo es un imán. Desde el punto de vista magnético, podrá considerarse éste como formado por dos masas magnéticas puntuales, iguales en valor absoluto, de signos contrarios e invariablemente ligadas una a otra.



Fig. 400

Este imán elemental ha recibido el nombre de *doblete magnético.* La experiencia del imán dividido nos conduce directamente a considerar un imán como formado por la yuxtaposición de gran número de filas de dobletes. Estos dobletes se suponen idénticos y colocados en forma contigua, en cada fila, de forma que el polo norte de uno coincida con el polo sur del otro (*fig.* 400). Si suponemos, lo que es

evidente según la ley de Coulomb, que dos masas magnéticas iguales y de signos contrarios colocadas en un mismo punto crean un campo nulo, las propiedades magnéticas de un imán no podrán aparecer más que en los puntos donde cesan las filas de dobletes. Los lugares de estos puntos de detención son lo que hemos denominado polos. Como los dobletes son todos idénticos, aparece con claridad que las masas magnéticas de cada punto son iguales en valor absoluto.

Acción de un campo uniforme sobre un imán. Momento magnético.

— Consideremos un imán colocado en un campo $\vec{H}$ uniforme (*fig.* 401), es decir, de magnitud y sentido constantes. Cada masa positiva libre m está sometida a una fuerza paralela al campo y del mismo sentido, de valor $m \cdot \vec{H}$. Todas las fuerzas que se ejercen sobre las masas positivas son paralelas, y por consiguiente admitirán la resultante $\vec{F}$, cuyo punto de aplicación estará en N. Análogamente, las masas negativas están sometidas a estas fuerzas, que admiten una resultante $\vec{F'}$ paralela al campo y de sentido contrario, cuyo punto de aplicación estará en S. Los puntos N y S son, respectivamente, los centros de gravedad de las masas positivas y negativas, y sus posiciones son independientes del campo $\vec{H}$ considerado. Estos puntos son los que se denominarán en lo sucesivo polos del imán. Obsérvese que esta definición no contradice la ya dada, sino que la precisa.

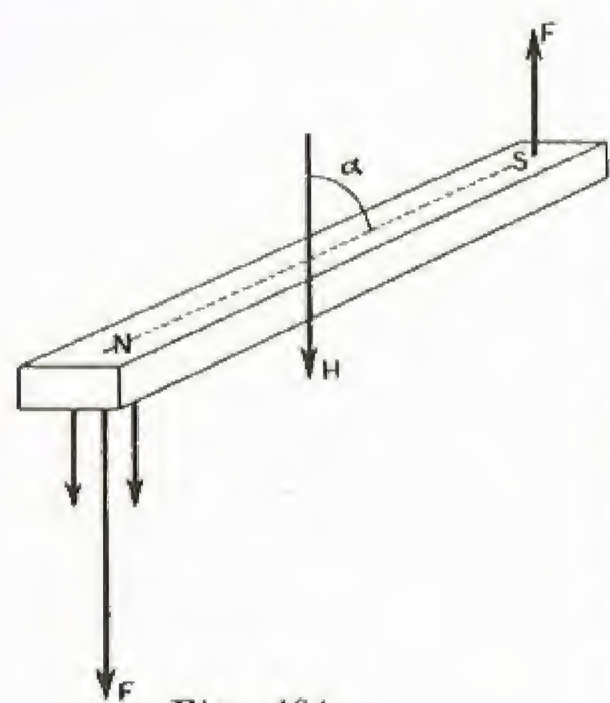


Fig. 401

Sea M la masa magnética positiva total del imán: según la ley de composición de fuerzas paralelas, se tendrá

$$\vec{F'} = M \cdot \vec{H},$$
$$\vec{F'} = M\vec{H}.$$

Las dos fuerzas $\vec{F}$ y $\vec{F'}$ son iguales y opuestas, y forman un par cuyo momento C es expresado por la fórmula

$$C = F \cdot NS \times \text{sen } \alpha,$$

siendo α el ángulo que forman los vectores $\vec{SN}$ y $\vec{H}$. Podrá escribirse

$$C = M \times H \times NS \times \text{sen } \alpha,$$

fórmula que pone de manifiesto que las propiedades magnéticas del imán sólo intervienen por medio del producto M × NS. Este hecho es general: un imán es completamente caracterizado desde el punto de vista magnético por el producto M × NS. Esta cantidad suele introducirse en los cálculos, por lo general, en forma de un vector: es el momento magnético del imán, *vector dirigido del polo sur al polo norte, y cuyo valor es el producto de la distancia de los polos por la carga positiva libre del imán.* Esta definición queda condensada en la fórmula

$$\vec{M} = M \cdot \vec{SN}.$$

$\vec{M}$ designa el momento magnético del imán; M, el valor algebraico de este vector. Con esta definición se tendrá

$$C = MH \text{ sen } \alpha.$$

Si el imán considerado puede girar libremente alrededor de un punto fijo, se orientará de tal forma que el momento del par C será nulo, lo que ocurrirá cuando lo sea sen α; el vector $\vec{SN}$ será entonces paralelo al campo $\vec{H}$ (*fig.* 402) y, por lo tanto, también el vector $\vec{M}$. Así, pues, un imán que pueda girar libremente alrededor de un punto fijo se orienta de tal forma que su momento magnético es paralelo al campo en el que está situado.

Fig. 402

Momento magnético de un sistema de imanes.

— Tomemos dos imanes idénticos y unámoslos rígidamente entre sí de forma que sus líneas de polos sean paralelas y que el polo norte de uno de ellos esté frente al polo sur del otro (*fig.* 403). En estas condiciones, los momentos magnéticos $\vec{M}$ y $\vec{M'}$ son paralelos, iguales y de sentidos contrarios. Estudiemos la acción de un campo uniforme sobre el sistema así constituido. El imán SN está sometido a un par que tiende a hacerle girar en el sentido de las agujas de un reloj. El imán S'N' está sometido al mismo par, pero que tiende a hacerle girar en sentido contrario.

En definitiva, el sistema de imanes está sometido a un par nulo, lo que equivale a que su momento magnético es nulo. Puede, pues, decirse que el conjunto de ambos imanes tiene un momento equivalente a la suma geométrica de los momentos magnéticos de los dos imanes. Este hecho es general:

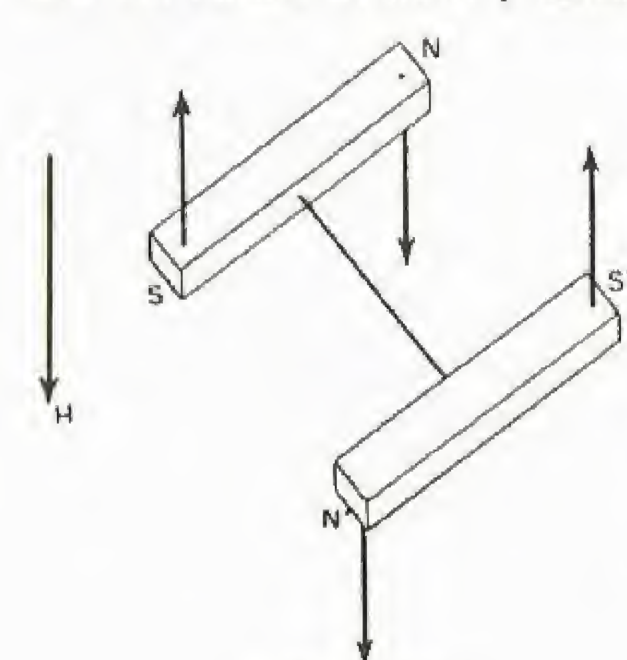


Fig. 403

Un sistema de imanes es equivalente a un solo imán cuyo momento magnético es la suma geométrica de los momentos magnéticos de los imanes del sistema.

Un sistema de imanes cuyo momento magnético resultante es nulo se denomina *sistema astático*. Tal es el caso del sistema formado por los dos imanes que acabamos de considerar.

Ejemplo. Un sistema formado por tres imanes idénticos cuyos polos del mismo nombre estén situados a 120° uno de otro (*fig.* 404) tiene un momento magnético nulo.

Campo creado por un imán pequeño. Posiciones de Gauss.

— El conocimiento del momento magnético basta, como se ha visto, para determinar la acción de un campo uniforme sobre un imán. Análogamente, sólo se necesitará conocer el momento magnético para expresar el campo creado por un imán pequeño. Sea un imán SN (*fig.* 405) cuyos campos en puntos tales como ABCD nos proponemos calcular. Supondremos esencialmente que la longitud de SN es muy pequeña con respecto a las distancias de los puntos ABCD a los polos N y S. Estos puntos ABCD constituyen las denominadas *posiciones de Gauss* del imán SN.

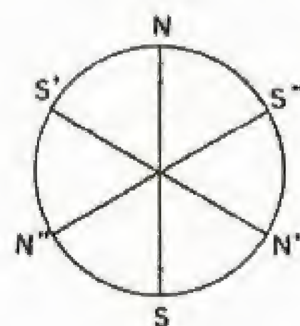


Fig. 404

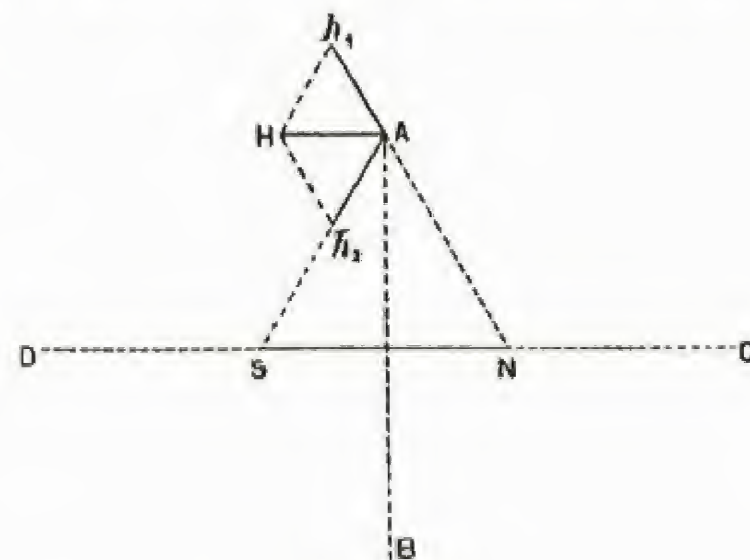


Fig. 405

La masa magnética + m, situada en N, crea en A un campo Ah_1, dirigido según NA, y cuyo valor es $\frac{m}{r^2}$, siendo r la distancia NA. Análogamente, la masa — m situada en S crea en A un campo Ah_2 dirigido según AS y cuyo valor absoluto es $\frac{m}{r^2}$.

La resultante de estos dos campos, cuyos valores absolutos son iguales, está dirigida según su bisectriz AH paralela a NS. Como los triángulos Ah_1H y ASN son semejantes, se tendrá

$$\frac{AH}{NS} = \frac{Ah_1}{NA} \quad \text{o} \quad \frac{AH}{NS} = \frac{Ah_1}{r} = \frac{m}{r^3},$$

$$AH = \frac{m \cdot NS}{r^3}.$$

Teniendo en cuenta que m × NS es el valor absoluto del momento magnético del imán, se tendrá

$$AH = \frac{|M|}{r^3}.$$

En B, el campo tiene el mismo valor absoluto y también el mismo sentido.

Calculemos ahora el campo del punto C (*figura* 406); hagamos NC = r. El campo creado por la masa + m, situada en N, es

Fig. 406

$$h_1 = \frac{m}{r^2}.$$

El campo creado por la masa + m, situada en S, es

$$h_2 = -\frac{m}{(r+l)^2},$$

haciendo SN = l.

El campo resultante es

$$H = \frac{m}{r^2} - \frac{m}{(r+l)^2}, \quad \text{o} \quad H = \frac{m\,[(r+l)^2 - r^2]}{r^2\,(r+l)^2};$$

$$H = \frac{m\,(2lr + l^2)}{r^2\,(r+l)^2} = \frac{m\left(\frac{2l}{r} + \frac{l^2}{r^2}\right)}{r^2\left(1 + \frac{l}{r}\right)^2};$$

como se ha supuesto que l es muy pequeño con respecto a r, podremos escribir:

$$H = \frac{2ml}{r^3}, \quad \text{o} \quad H = \frac{2\,|M|}{r^3}.$$

En D, el campo tiene el mismo valor y el mismo sentido.

Se observa, pues, que para un mismo valor de r, el campo en C es doble del campo en A. Este resultado, que la experiencia verifica perfectamente, confirma nuestras hipótesis.

En todas las fórmulas que acabamos de establecer sólo interviene el momento magnético del imán.

Intensidad de imantación. — Según nuestras hipótesis, un imán está constituido por un gran número de dobletes, y su momento magnético $\vec{M}$ es la suma geométrica de los momentos magnéticos de cada uno de los dobletes. Para medir la imantación de un imán, se utilizará, pues, el momento magnético de la unidad de volumen del imán. Si v es este volumen, definiremos un *vector intensidad de imantación media* $\vec{I}$ por la fórmula

$$\vec{I} = \frac{\vec{M}}{v},$$

y la *intensidad de imantación en un punto* de la materia imantada como la relación entre el momento magnético $d\vec{M}$ de un pequeño volumen de materia que rodea el punto y el valor dv de este volumen:

$$\vec{I'} = \frac{d\vec{M}}{dv}.$$

La intensidad de imantación $\vec{I'}$ se dice que es *uniforme* si es la misma en todos los puntos, es decir, si en cada punto de la materia imantada el vector $\vec{I'}$ tiene la misma magnitud, dirección y sentido. Puede verse fácilmente que en estos casos

$$\vec{I} = \vec{I'}.$$

Consideremos una barra imantada cuya intensidad de imantación es uniforme y paralela al lado mayor (*fig.* 407); sólo puede estar constituida por filas de dobletes paralelos a los lados de la barra y mutuamente equidistantes, de donde resultará que la densidad de las masas magnéticas σ en las caras terminales es uniforme. Si s es el valor de la sección normal de la barra que posee masas magnéticas libres $+ m$ y $- m$, respectivamente iguales a $s\sigma$ y $- s\sigma$, y l es la longitud de la barra, su momento magnético será



Fig. 407

$$M = \sigma \times s \times l.$$

Pero como el volumen de la barra es $s \times l$, se tendrá

$$M = \sigma \times v,$$

de donde se deduce $\quad I = \sigma.$

Cuando una barra imantada tiene una imantación uniforme en el sentido de su longitud, la densidad magnética sobre una sección normal es igual al valor absoluto de su imantación.

Magnetismo terrestre
Medidas magnéticas

Campo magnético terrestre. — El campo magnético terrestre es uniforme, y para comprobarlo basta demostrar que su acción sobre un imán se reduce a un par. Un par tiene componentes nulas en todas sus direcciones; vamos, pues, a mostrar que un imán colocado en el campo terrestre no está sometido a ninguna fuerza vertical ni horizontal.

El campo terrestre no ejerce ninguna fuerza vertical sobre una barra imantada, puesto que dicha barra no aumenta ni disminuye de peso después de la imantación. Un hilo del que pende un imán permanece completamente vertical, lo que no ocurriría si estuviera sometido a una fuerza horizontal: el campo terrestre es, por consiguiente, uniforme, al menos en un espacio bastante reducido, como, por ejemplo, el de la sala en donde se hacen estas experiencias.

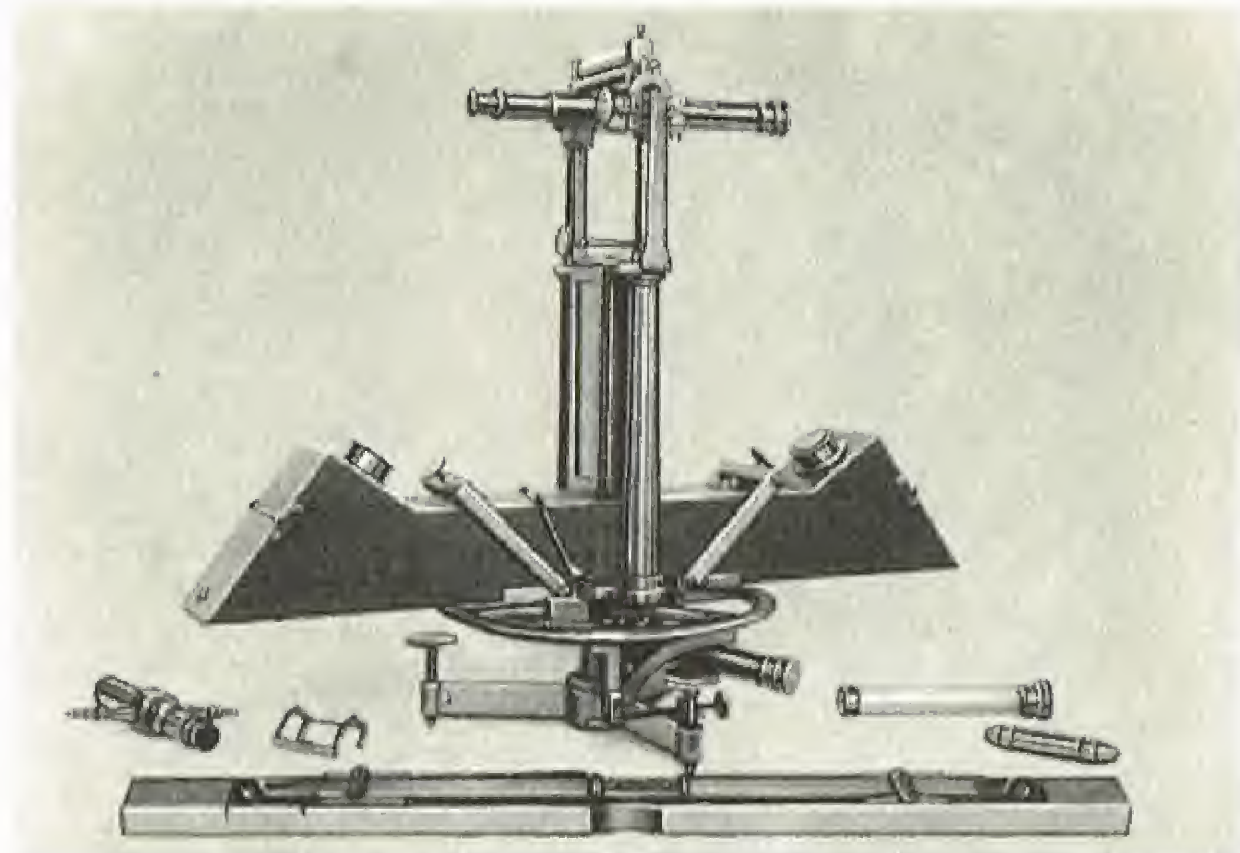
Consideremos en un punto O de la tierra (*fig.* 408) el plano vertical que contiene la dirección del campo magnético terrestre en este punto: este plano se denomina *plano meridiano magnético del punto O*, o, más sencillamente, meridiano magnético.

Tracemos dos ejes en este plano, uno horizontal Ox y otro vertical Oy. Las componentes OH_1 y OH_2 del campo terrestre sobre estos ejes son la *componente horizontal* y la *componente vertical* del campo terrestre.

Fig. 408

Declinación magnética. — Dijimos que la aguja de una brújula adoptaba la dirección norte-sur, lo que no es completamente exacto, ya que dicha aguja forma con la dirección norte-sur un pequeño ángulo denominado *ángulo de declinación magnética* o, simplemente, *declinación*. Con más precisión, *la declinación es el ángulo que forman el meridiano magnético y el meridiano geográfico del lugar considerado*; la declinación será oeste o este según que el meridiano magnético esté situado al oeste o al este del meridiano geográfico.

Es evidente que el conocimiento de la declinación reviste gran importancia para la navegación. Para medirla, se emplea una aguja imantada llamada *aguja de declinación* (*fig.* 409); esta aguja gira alrededor de un eje vertical en un plano horizontal. Para conseguir este resultado se hace pasar el eje vertical por el centro de gravedad de la aguja sobrecargando la parte sur de la misma. En efecto, como el campo magnético terrestre está dirigido hacia el suelo en el hemisferio boreal, el polo norte de la aguja tendría tendencia a dirigirse también hacia el suelo; la sobrecarga colocada sobre la parte sur neutraliza este efecto.



Brújula de declinación (Conservatorio de Artes y Oficios de París)



Fig. 409

Una vez realizada la brújula de declinación, se hace que sus extremidades se desplacen en un círculo dividido. Si se conocen las divisiones por las cuales pasa el meridiano geográfico, basta una simple lectura para conocer la declinación. En realidad, se hacen dos lecturas, obteniendo la segunda invirtiendo la posición de las caras de la aguja imantada, y haciendo un promedio de ambas.

Esta precaución es necesaria por el hecho de que la línea de los polos de la aguja no coincide con el eje geométrico. Sea NS la línea de los polos: esta línea se coloca en los dos casos según la dirección de la componente horizontal del campo terrestre; el ángulo α (*fig.* 410) que forma con el eje geométrico permanece constante, pero cambia de sentido. Si D es la declinación exacta, la primera medida dará D + α, por ejemplo, y la segunda D — α; al hacer el promedio, se obtiene D.

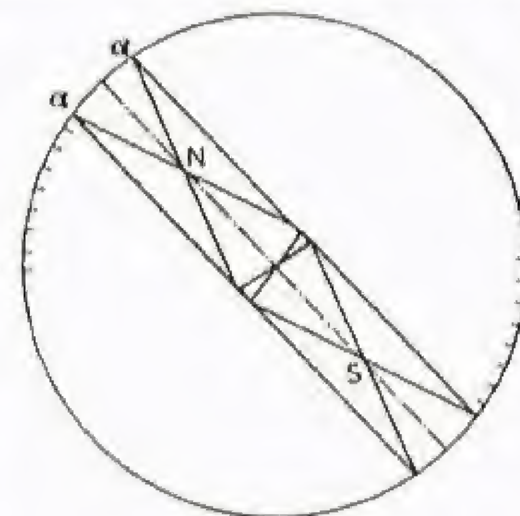


Fig. 410

Para las medidas de precisión se combina la brújula de declinación con un teodolito, que permite determinar muy exactamente el meridiano geográfico.

La declinación varía con el espacio y el tiempo, siendo muy diferente de un lugar a otro. En Francia, donde la declinación es occidental, su valor era en París (1952) 7°18'. En Asia y América la declinación es oriental.

Las variaciones con arreglo al tiempo se clasifican en variaciones seculares, anuales, diurnas y accidentales. La declinación, que en 1556 era de 8° Este en París, llegó a ser nula en 1666 y después atravesó el máximo de 22° 31' Oeste en 1814; en la actualidad disminuye 6 minutos al año aproximadamente. En 24 horas, la declinación presenta dos máximos: la amplitud de la variación diurna es variable según las estaciones, el lugar y el número de manchas solares. Finalmente, la declinación sufre variaciones accidentales (tormentas magnéticas) que suelen coincidir muy frecuentemente con auroras boreales, erupciones volcánicas o temblores de tierra.

Inclinación magnética. — *La inclinación magnética es el ángulo que forma el campo magnético terrestre con un plano horizontal.* Para medirla, se utiliza una *brújula de inclinación*, constituida por una aguja imantada móvil alrededor de un eje horizontal que pasa *exactamente* por su centro de gravedad. Los extremos de la aguja se desplazan ante un círculo graduado (*fig.* 411). Llevando la aguja al meridiano magnético, se orienta en la dirección del campo, y entonces basta con efectuar dos medidas cuyo promedio da —como para la declinación— el valor de la inclinación.

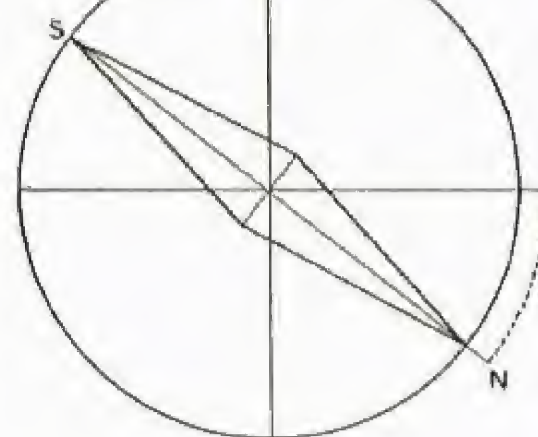
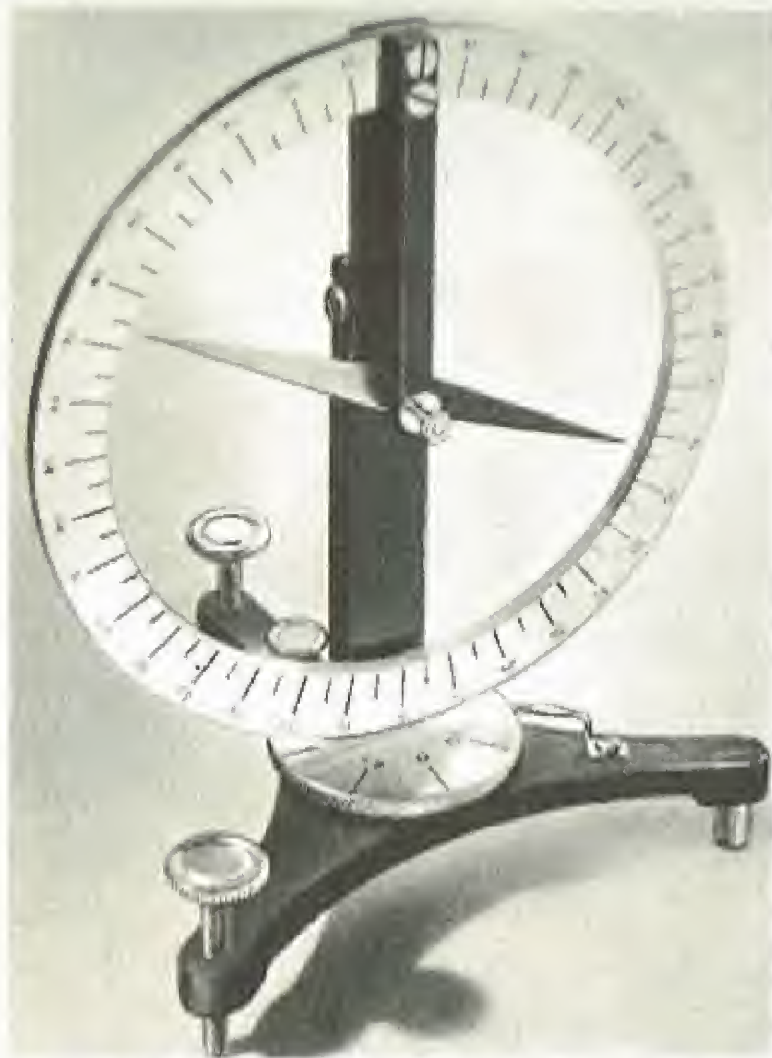


Fig. 411

El valor de la inclinación es actualmente en París 64° y varía con el tiempo y el espacio. En el espacio, varía regularmente a lo largo de líneas denominadas *meridianos magnéticos* y que son tangentes en cada uno de sus puntos a la dirección de la brújula en ese punto.

La inclinación vale 90° en el polo norte magnético, punto cuya posición es variable; esta posición disminuye cuando se va hacia el sur y se anula en la proximidad del ecuador. Después aumenta —pero esta vez el polo sur señala la tierra— y se hace igual a 90° en el polo sur magnético.


Brújula de inclinación (Conservatorio de Artes y Oficios de París)

La inclinación varía con el tiempo en Francia; desde 1671, época en que valía 75°, disminuye constantemente.

Con el método que acabamos de describir, puede medirse la inclinación con una precisión de un minuto. Más adelante expondremos un método (pág. 137) que permite obtener una precisión de 10 segundos.

Principio de las mediciones magnéticas. — Procedamos ahora a medir el campo magnético, del que sólo hemos determinado hasta este momento la dirección. El método que utilizaremos se aplica a cualquier campo magnético y permite, además, medir los momentos magnéticos de los imanes. Sean H_1 y M, respectivamente, la componente horizontal del campo terrestre y el momento magnético de un imán. En una primera serie de operaciones mediremos el cociente $\frac{M}{H_1} = A$, y en una segunda, el producto $MH_1 = B$; se tendrá $M^2 = AB$; $H_1^2 = \frac{B}{A}$; conociendo H_1, deduciremos el campo H por el conocimiento de la inclinación $H = \frac{H_1}{\cos I}$.

Medida de $\frac{M}{H_1}$. Magnetómetro. — Para medir el cociente $\frac{M}{H_1}$, se utiliza un aparato denominado *magnetómetro*, que está formado por un imán pequeño (un centímetro de longitud, por ejemplo) suspendido a un hilo sin torsión y que lleva un espejo, de manera que puedan medirse las rotaciones por el método de Poggendorff. Todo ello está contenido en una caja de vidrio, sin hierro, a fin de eliminar la acción de las corrientes de aire. Como el imán del magnetómetro es pequeño, se podrá siempre suponer que está sometido a un campo uniforme, cualquiera que sea la causa de este campo.

En ausencia de cualquier otro campo, el imán del magnetómetro se orienta en la dirección H_1 de la componente horizontal del campo terrestre. Si se crea otro campo h perpendicular a H_1 (*fig.* 412), el imán se orientará en la dirección *oz* de la resultante de H_1 y h. El ángulo α que ha girado el imán será dado por la relación

Fig. 412

$$tg\ \alpha = \frac{h}{H_1}.$$

Podemos medir α y por consiguiente el cociente $\frac{h}{H_1}$, lo que permite calcular h si se conoce H_1, y recíprocamente.

Supongamos que h sea el campo creado por un imán de momento M de tal forma que el punto O sea una posición de Gauss. Se tendrá

$$h_1 = \frac{2M}{r^3} \quad \text{o} \quad h_2 = \frac{M}{r^3},$$

de donde $tg\ \alpha_1 = \frac{2}{r^3}\frac{M}{H_1}$, $\quad tg\ \alpha_2 = \frac{1}{r^3}\frac{M}{H_1}$,

en donde α_1 y α_2 son las desviaciones del magnetómetro. Estas fórmulas nos permiten:

1° Verificar que se tiene $h_1 = 2h_2$, ya que $tg\ \alpha_1 = 2\ tg\ \alpha_2$;

2° Calcular los cocientes de los dos momentos magnéticos: se tiene, en efecto, $\frac{M}{M'} = \frac{tg\ \alpha_1}{tg\ \alpha'_1} = \frac{tg\ \alpha_2}{tg\ \alpha'_2}$, si se conserva la misma distancia r;

3° Medir, en especial, el cociente $\frac{M}{H}$ por simples medidas de ángulo (α) y de longitud (r).

Medida del producto MH_1. — Sobre un imán cuyo momento magnético M sea móvil alrededor de un eje vertical, el campo terrestre ejerce un par C

$$C = MH_1 \text{ sen } \theta.$$

Supongamos que el imán está en su posición de equilibrio $\theta = 0$ (*fig.* 143), y desviémoslo un ángulo θ pequeño; el par C tenderá a que recobre su posición de equilibrio y como θ es pequeño, podrá escribirse

$$C = MH \cdot \theta.$$

Fig. 413

Este par es análogo en su expresión al par que actúa sobre un péndulo ($C = mgl\theta$); por consiguiente, el imán efectuará oscilaciones pendulares, y si I es su momento de inercia con respecto al eje de rotación, el período T de oscilación es dado por la fórmula

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{MH}}.$$

Si conocemos I, obtendremos el producto MH por simple medida de T.

Efectuando mediciones para varios imanes de momentos M, M', etc., podrán calcularse los cocientes $\frac{M}{M'}$, etc.

Con estos métodos se obtiene una precisión de $\frac{1}{10\,000}$ para la medida de la componente horizontal H_1 del campo terrestre. También se utilizan otros métodos más rápidos que se expondrán más adelante.

La componente H_1 varía de un lugar a otro del globo. El 1 de enero de 1952 su valor era, en París, 0,202 oersted, siendo el valor de la componente vertical 0,415 oersted y el campo total 0,459 oersted.

En cuanto al valor de M, depende evidentemente del imán que se utilice; para los imanes corrientes varía entre 500 y 100 por centímetro cúbico.

Causas del magnetismo terrestre. — Son, al parecer, múltiples. No cabe duda que el sol ejerce una acción, así como el magnetismo de ciertas rocas. Por otra parte, la tierra está atravesada por corrientes eléctricas, denominadas *corrientes telúricas*, que crean un campo magnético (v. ELECTROMAGNETISMO). Cualesquiera que sean sus causas, esta cuestión no está todavía aclarada.

Minas magnéticas. — En estas minas marinas, que fueron utilizadas por los alemanes en 1939, la variación de la componente vertical del campo terrestre provoca su encendido. En la figura 414 se representa el esquema del detonador. El paso de un navío basta para modificar suficientemente, a causa de su masa de hierro, el campo terrestre, de forma que la aguja imantada gira un ángulo pequeño alrededor de su eje y cierra el circuito eléctrico del detonador. Para defenderse contra estas minas se "desmagnetizaron" los navíos, rodeándolos con un circuito eléctrico.

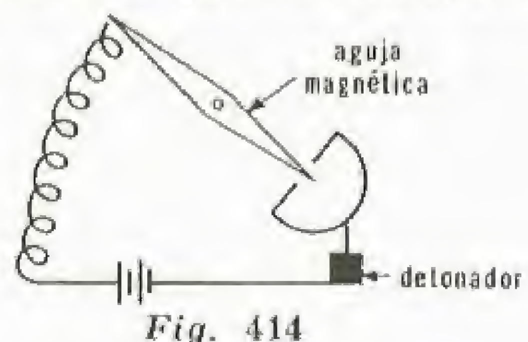
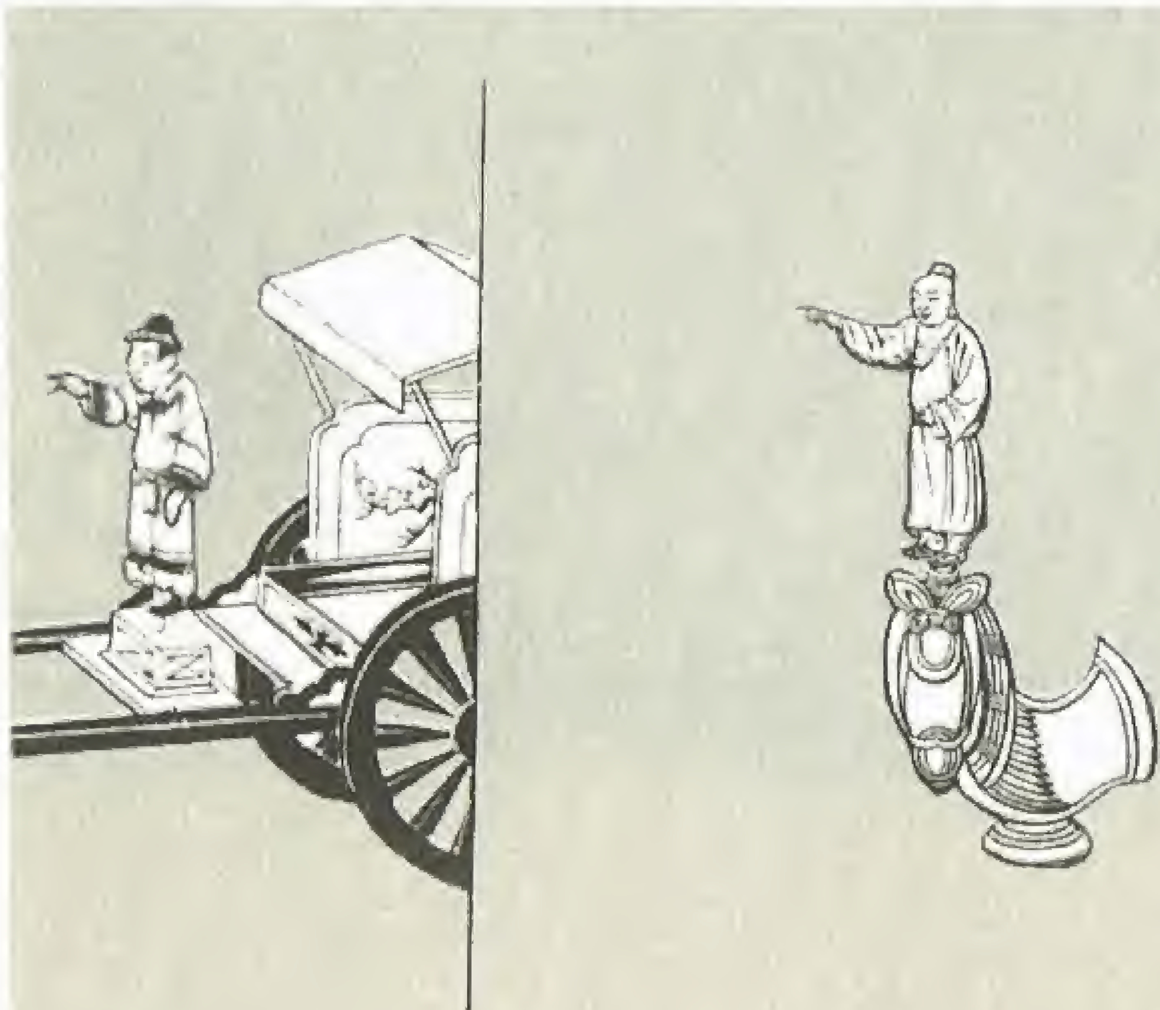


Fig. 414

Brújula magnética china





Electrocinética

Noticia histórica. — **Corriente eléctrica. Ley de Ohm:** Definición de la corriente eléctrica. Obtención de corrientes continuas. Propiedades de la corriente eléctrica. Unidad de intensidad de corriente. Amperio. Ley de Ohm. Resistencia. Suma de resistencias. Resistividad. Conductancia. Unidades de resistencia y de resistividad. Reóstatos. Cajas de resistencias. Variación de la resistividad con la temperatura y los diferentes agentes. Teoría de la resistencia. — **Efectos caloríficos de la corriente. Ley de Joule. Fuerza electromotriz y contraelectromotriz:** Efectos caloríficos de la corriente. Ley de Joule. Aplicaciones del efecto calorífico de la corriente. Amperímetros térmicos. Características de una fuente de electricidad. Fuerza electromotriz. Receptores. Fuerza contraelectromotriz. Generalización de la ley de Ohm. — **Corrientes derivadas. Medición de resistencias y de f. e. m.:** Corrientes derivadas. Shunts. Leyes de Kirchhoff. Medición de resistencias. Puente de Wheatstone. Medición de f. e. m. por el método de oposición. — **Electrólisis. Acumuladores:** Electrólisis. Leyes cualitativas. Leyes cuantitativas. Leyes de Faraday. Amperio internacional. Aplicaciones de la electrólisis. Teoría iónica. Polarización de los electrodos. Electrólisis invisible. Acumuladores. Acumuladores de níquel. Acumuladores de plata. — **Pilas eléctricas:** Pila de Volta. Pila Leclanché. Pilas impolarizables. Asociación de generadores. Efecto Peltier. Efecto Thomson. Pilas termoeléctricas

Noticia histórica. — El descubrimiento de la *pila* por **Volta** (1745-1827) constituye la iniciación de la ciencia de la corriente eléctrica.

Galvani (1737-1798) demostró, en 1790, que el contacto de dos metales diferentes provocaba contracciones en los músculos de la rana, por lo que atribuyó la creación de esta electricidad a los nervios y a los músculos del animal, que comparó con las armaduras de una botella de Leyden. Volta, sorprendido por la necesidad de disponer de dos metales diferentes para obtener fuertes contracciones, las atribuyó a la electricidad engendrada al entrar en contacto estos dos metales. Tanto Galvani como Volta estaban equivocados, pero esta discusión condujo a Volta al descubrimiento de la pila (1800), que permitió a Nicholson y a Carlisle descomponer el agua. En 1801, **Thénard** (1777-1857) demostró que las corrientes eléctricas, como las descargas de las baterías, podían producir la incandescencia de hilos metálicos (primera idea de la lámpara de incandescencia). En 1807, **Davy** (1778-1829) descompuso los álcalis y descubrió, gracias a la pila, nuevos metales.

En 1802, **Gautherot** descubrió la polarización, y en 1814, **Wollaston** (1766-1826) inventó un nuevo modelo de pila, sucediéndose desde entonces rápidamente los perfeccionamientos de la pila.

En 1829, **Becquerel** (1788-1878) inventó la primera pila de dos líquidos. La pila de **Daniell** (1790-1845) data de 1836. Este mismo año, **Grove** (1811-1896) construyó una pila con despolarizante que, modificada después por **Archereau** y **Bunsen** (1843), se denominó pila de Bunsen.

En 1886, **Leclanché** inventó un modelo de pila con despolarizante sólido.

En 1893, **Weston** inventó una pila que se eligió en 1908 como patrón de fuerza electromotriz. Las pilas modernas son pilas *Fery*.

Pilas termoeléctricas. **Seebeck** (1770-1831) señaló en 1821 fenómenos termoeléctricos debidos a una diferencia de temperatura establecida entre los puntos de unión o soldaduras de dos metales diferentes.

En 1834, **Peltier** (1785-1845) descubrió que en un circuito constituido por dos metales diferentes el paso de una corriente provoca efectos térmicos (efecto Peltier).

En 1856, **Thomson** descubrió el efecto que lleva su nombre. Becquerel clasificó los metales desde el punto de vista termoeléctrico. **Melloni** (1798-1854) estudió en 1830 los rayos caloríficos valiéndose de un par termoeléctrico.

Los pares termoeléctricos modernos fueron introducidos en 1886 por **Henry Le Chatelier** (1850-1936).

Paso de la corriente por los metales. En 1827, **Ohm** (1787-1854) estableció una relación entre la fuerza electromotriz de una pila y la intensidad de la corriente que crea en un circuito de resistencia conocida (ley de Ohm).

Fechner (1801-1887) confirmó, en 1831, la ley de Ohm; **Pouillet** (1791-1868) volvió a obtener los mismos resultados en 1837 (*brújula de tangentes). **Kohlrausch** (1809-1858) expuso en 1848 en qué consiste la *resistividad*.

Kirchhoff (1824-1887) fijó la distribución de una corriente a la que se imponen derivaciones. **Wheatstone** (1802-1875) inventó en 1844 el puente de su nombre para la medición de resistencias; *Thomson* creó otro dispositivo para medir las resistencias pequeñas en 1862 (puente de Thomson).

Joule (1818-1889) estudió, en 1841, los fenómenos producidos por las corrientes eléctricas y el calor que ellas desprenden en los circuitos (ley de Joule), demostrando el origen de esta energía. **Clausius** (1822-1888) determinó en 1852 el equivalente mecánico de la descarga eléctrica que corresponde a un determinado calentamiento de un hilo.

Paso de la corriente por los líquidos. Electrólisis. En 1805, **Grotthus** (1785-1822) estableció una primera teoría de la electrólisis descubierta por **Carlisle** y **Nicholson** (1753-1815) en 1800. **Davy** y después **Faraday** estudiaron las descomposiciones electrolíticas, y Faraday, en 1833, estableció la ley de los equivalentes eléctricos. En 1857, **Clausius** dio una nueva teoría de la electrólisis, que fue completada en 1887 por **Arrhenius,** con una hipótesis sobre la disociación en iones de los electrolitos.

Los **acumuladores,** aplicación directa de la electrólisis, se deben a **Planté** (1834-1889), en 1859, después de los trabajos de **Kastner** (1825), **Wheatstone** (1843) y **Sinsteden** (1854). **Faure** (1881) perfeccionó el acumulador de plomo. **Edison** (1847-1931) inventó un nuevo modelo de acumulador: el acumulador de hierro-níquel.

Entre las restantes aplicaciones de la electrólisis hay que citar la galvanoplastia, inventada en 1837 por **H. Jacobi** (1801-1874), y perfeccionada en 1841 por **Ruolz** (1808-1887) y **Elkington.**

Paso de la corriente por los gases rarificados. **Hawskbee** indicó a principios del siglo XVIII la conductividad eléctrica de los gases a baja presión. **Masson** (1806-1858) en 1853 y **Geissler** (1814-1879) en 1855, produjeron descargas a través de los gases rarificados. Estas experiencias fueron perfeccionadas cuando Geissler inventó una bomba de mercurio que permite la obtención de vacíos del orden de un milímetro de mercurio.

Hittorf descubrió en 1868 los rayos catódicos, que fueron después estudiados por **Tait** (1831-1901), **Hertz** (1857-1894), **J.-J. Thomson** (1857-1940) y **Jean Perrin** (1870-1942), **Goldstein** (1850-1930) descubrió, en 1886, los **los rayos positivos,** y **Roentgen** (1845-1923), en 1895, los rayos X.

Corriente eléctrica. Ley de Ohm

Definición de la corriente eléctrica. — En electrostática se estudia el equilibrio de la electricidad en los conductores. Hemos visto que en ciertas experiencias la electricidad se transmite a tierra, o pasa de un conductor a otro, pero sin preocuparnos de establecer las leyes de estos desplazamientos, cuyo objeto constituye la *electrodinámica.*



Fig. 415

Sean dos conductores A y B (*fig.* 415) de potenciales V y V' y cargas Q y Q', unidos por un hilo también conductor. En el espacio que rodea A y B se crea un campo eléctrico; si suponemos $V > V'$, las líneas de fuerza irán desde A hacia B, y las cargas positivas de A se desplazarán en el conductor para llegar hasta B, mientras que las cargas negativas de B se desplazarán hacia A. Este desplazamiento de electricidad no cesa más que cuando el conductor único formado por AB y el hilo está al mismo potencial V_1, comprendido entre V y V', en todos sus puntos. Se dice que se ha producido entre A y B una *corriente eléctrica.* Supongamos que la capacidad del hilo es despreciable y sean Q_1 y Q'_1 las nuevas cargas de A y B. De acuerdo con la ley de conservación de la electricidad, se tendrá

$$Q + Q' = Q_1 + Q'_1.$$

La carga de A ha disminuido —puesto que su potencial ha disminuido— la cantidad

$$q = Q - Q_1.$$

La carga de B ha aumentado la cantidad

$$q' = Q' - Q'_1.$$

Ahora bien: $Q - Q_1 = Q' - Q'_1$, puesto que $Q + Q' = Q_1 + Q'_1$.
Por consiguiente, $q = q'$.

Puede decirse entonces: la corriente eléctrica ha transportado una carga eléctrica cuya *suma algebraica* es igual a q. La experiencia no permite conocer la forma en que se ha realizado este transporte, es decir, si la corriente ha transportado la carga $+q$ desde A hacia B o la carga $-q$ desde B hacia A, o si se han transportado ambas clases de electricidad. El hecho experimental es que se ha realizado un transporte de la carga q. El conocimiento de q y de los potenciales nos basta para calcular la energía liberada por esta corriente eléctrica; únicamente esta energía es accesible a la experencia y, por consiguiente, sólo ella nos interesa. Puede emitirse, por lo tanto, sin ningún inconveniente, la siguiente hipótesis:

La corriente eléctrica ha transportado de A *a* B *una carga positiva igual a* q.

En adelante consideraremos siempre una corriente eléctrica como un transporte de electricidad positiva; denominaremos sentido de la corriente el sentido en el que se efectúa este transporte. En la experiencia precedente, el sentido de la corriente es el de A hacia B. Por consiguiente, podrá decirse: *la corriente eléctrica va de los potenciales más elevados a los potenciales menos elevados.*

El conocimiento de q no basta para caracterizar completamente la corriente, sino que hay que saber a qué velocidad se efectúa el transporte de electricidad; esta velocidad se denominará intensidad de la corriente. Con más precisión: *si durante un tiempo muy breve* dt *se ha transportado una cantidad de electricidad* dq, *la intensidad de la corriente en ese instante es*

$$i = \frac{dq}{dt}.$$

Estudiaremos al principio únicamente las corrientes cuya *intensidad es constante*, es decir, las corrientes que transportan a cada segundo la misma cantidad de electricidad: estas corrientes se llaman *continuas.* Sea i la intensidad de una corriente de este tipo: al cabo de un tiempo t ha transportado la cantidad de electricidad q, y se tendrá

$$q = i \cdot t.$$

Obtención de corrientes continuas. — Unamos los conductores A y B (*fig.* 416) a una fuente de electricidad P que mantenga constantes los potenciales V y V′ de A y B. Esta fuente puede estar constituida por una máquina electrostática o una *pila*, formada a su vez por una lámina de cinc y otra de cobre sumergidas en ácido sulfúrico (*fig.* 417). Si unimos ahora A y B

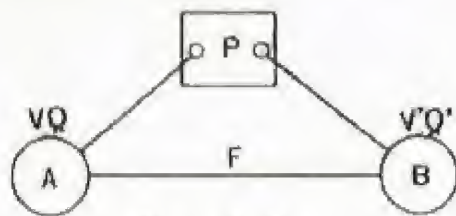


Fig. 416

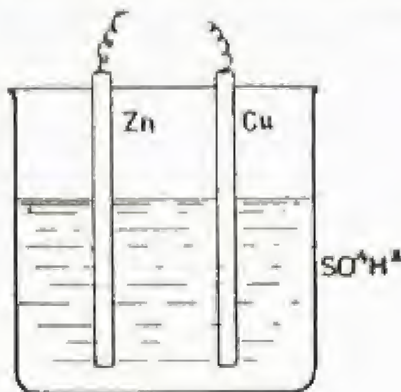


Fig. 417

entre sí por un hilo conductor *f*, se tendrá, como anteriormente, una corriente eléctrica a lo largo de F, pero esta corriente, en lugar de cesar al cabo de cierto tiempo, se mantendrá, ya que el potencial de A no puede nunca igualarse con el de B. La causa que produce la corriente es la diferencia de potencial V — V′, diferencia que permanece constante, por lo cual la corriente será siempre idéntica, a sí misma, y su intensidad permanecerá constante: hemos obtenido una corriente continua.

Sea *i* la intensidad de la corriente: A pierde una cantidad de electricidad por segundo igual a *i*, pero como su potencial sigue siendo el mismo, su carga será constante, y por consiguiente recibirá de la fuente P una cantidad de electricidad por segundo igual a *i*. Análogamente, P sustrae a B una cantidad de electricidad por segundo *i* y podemos decir que cualquier punto del *circuito cerrado* A, F, B, P, A es recorrido a cada segundo por la cantidad de electricidad *i*: *la intensidad de la corriente es la misma en todos los puntos del circuito.*

La fuente P sólo difiere de los restantes elementos del circuito en que eleva la electricidad que lo atraviesa del potencial V′ al potencial V. Esta corriente eléctrica puede compararse con una corriente de agua en la que A y B serían los depósitos, los hilos conductores las tuberías y P una bomba que eleva el agua desde el nivel V′ del depósito B al nivel V del depósito A.

El período de tiempo, sumamente breve, que transcurre al unir los conductores A y B por el hilo F se denomina período de establecimiento de la corriente, y se explica en parte por la capacidad del hilo F, que se carga. Una vez cargado, conservará una carga constante. Aunque se ha supuesto que la capacidad del hilo F es despreciable, se puede prescindir de esta hipótesis, ya que una vez transcurrido el período de establecimiento de la corriente el hilo no puede adquirir más carga y cada sección del hilo es atravesada cada segundo por la cantidad de electricidad *i*. En los fenómenos que se estudiarán en adelante supondremos siempre ya transcurrido el período transitorio de establecimiento de la corriente, que, repetimos, es sumamente breve: 1/100 de segundo, como máximo, para los circuitos usuales.

Propiedades de la corriente eléctrica. — Al producirse una corriente eléctrica se libera energía: cada segundo, en efecto, pasa del potencial V al potencial V′ una cantidad de electricidad *i*, y la energía liberada es

$$i(V - V');$$

al cabo de *t* segundos se habrá liberado la energía

$$W = (V - V')it.$$

Esta energía aparece bajo formas diferentes; la experiencia nos indica que estas formas son:

1° Un conductor se calienta al ser recorrido por una corriente;

2° Una sal, una base o un ácido son descompuestos por la corriente;

3° Una corriente eléctrica crea un campo magnético.

La energía eléctrica aparece, pues, bajo forma de energía calorífica, química o magnética, ya separadamente, ya simultáneamente. Estudiaremos sucesivamente los tres fenómenos, cada uno de los cuales nos proporcionará un método de medición de la intensidad de una corriente, aunque puede ya definirse la unidad de intensidad de corriente e imaginar un método de medición.

Unidad de intensidad de corriente. Amperio. — Con arreglo a la fórmula

$$i = \frac{q}{t},$$

se define *la unidad electrostática de intensidad de corriente como la intensidad de una corriente que transporta cada segundo una cantidad de electricidad igual a la unidad electrostática C. G. S. de cantidad de electricidad.*

Ya se ha definido como unidad práctica de cantidad de electricidad el *culombio*, que vale 3.10^9 unidades electrostáticas C. G. S.; por consiguiente, puede definirse una unidad práctica de intensidad de corriente, el *amperio*, como *la intensidad de la corriente que transporta un culombio por segundo.* El amperio vale, evidentemente, 3.10^9 unidades electrostáticas C. G. S.

¿Cómo es posible medir la intensidad de una corriente? La energía liberada por la corriente eléctrica en el tiempo *t* es

$$W = (V - V')it.$$

Si toda esta energía aparece bajo forma de calor, la cantidad de calor producida Q es expresada por la fórmula

$$JQ = W = (V - V')it,$$

donde J es el equivalente mecánico del calor. Q (V — V′) y *t* pueden medirse; por consiguiente, puede deducirse *i*. Este método no es naturalmente práctico y no se utiliza nunca, pero podría serlo y, en todo caso, nos permite exponer las leyes de la corriente eléctrica en un orden lógico.

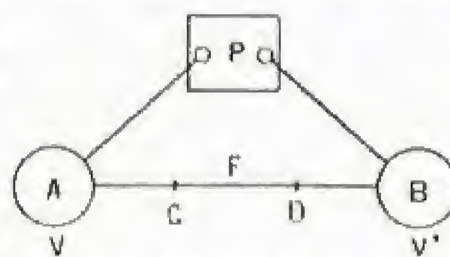


Fig. 418

Ley de Ohm. Resistencia. — Consideremos nuevamente la experiencia que ha permitido crear una corriente continua, pero tomando diferentes fuentes, P, P_1, P_2 (*figura* 418), etc., que establecen entre A y B diferencias de potencial $V - V'$, $V_1 - V'_1$, $V_2 - V'_2$. Al medir las intensidades I, I_1 e I_2, se encuentra que

$$\frac{V - V'}{I} = \frac{V_1 - V'_1}{I_1} = \frac{V_2 - V'_2}{I_2} = \text{constante} = R,$$

es decir: *la intensidad de la corriente que recorre un conductor lineal es proporcional a la diferencia de potencial en sus extremos. Esta ley se conoce por ley de Ohm.*

$$I = (V - V')\frac{1}{R}$$

$$I_1 = (V_1 - V'_1)\frac{1}{R}, \text{ etc.}$$

Si se reemplaza el hilo F por un hilo F′, la constante R varía; esta constante es, pues, característica del hilo F, y se llama *resistencia.*

Consideremos el trozo CD del conductor F; si V_C y V_D son los potenciales de los puntos C y D, se tendrá, al aplicar la ley precedente,

$$r \cdot I = (V_C - V_D);$$

la constante *r* es, por definición, la resistencia del trozo CD del conductor F. Por consiguiente:

La resistencia de un conductor lineal es el cociente de la diferencia de potencial entre sus extremidades por la intensidad de la corriente que lo recorre.

$$R = \frac{V - V'}{I}.$$

Suma de resistencias. — Sean tres conductores AB, BC, CD (*figura* 419), colocados uno a continuación de otro —también se dice en serie—, cuyas resistencias son r_1, r_2, r_3. Sean V_A, V_B, V_C, V_D los potenciales de los puntos ABCD, e I la intensidad de la corriente. Se tendrá

Fig. 419

$$V_A - V_B = r_1 I$$
$$V_B - V_C = r_2 I$$
$$V_C - V_D = r_3 I.$$

Sumando estas igualdades miembro a miembro se tendrá

$$V_A - V_B + V_B - V_C + V_C - V_D = (r_1 + r_2 + r_3)I$$

o

$$V_A - V_D = (r_1 + r_2 + r_3)\ I$$

lo que significa que la resistencia de AD es la suma de las resistencias de los hilos que la constituyen. Es decir: *dos resistencias colocadas en serie se suman,* o, también, *la resistencia de una serie de conductores es igual a la suma de las resistencias de cada uno de ellos.*

Los resultados de este párrafo y del anterior sólo son válidos:

1° Si el circuito está perfectamente aislado;

2° Si todos los puntos del circuito están a la misma temperatura.

No obstante, la ley de adición de resistencias subsiste aunque no se cumpla la segunda condición, pero deja de verificarse que

$$V_A - V_D = (r_1 + r_2 + r_3)\ I,$$

Resistividad. Conductancia. — Se ha obtenido experimentalmente que la resistencia de un conductor lineal es proporcional a su longitud e inversamente proporcional a su sección y que depende de la naturaleza del conductor. Si *l* es la longitud, *s* la sección y R la resistencia, se tendrá

$$R = \rho\frac{l}{s}.$$

El coeficiente ρ, característico de la naturaleza del conductor, se llama *resistividad*, y su inverso $\sigma = \frac{1}{\rho}$, *conductancia.* Este coeficiente ρ varía con la temperatura, como se verá más adelante.

Unidades de resistencia y de resistividad. — La fórmula V — V′ = RI permite definir la unidad electrostática C. G. S. y la unidad práctica de resistencia.

La unidad electrostática C. G. S. de resistencia es la resistencia que es recorrida por una corriente de intensidad igual a la unidad cuando la diferencia de potencial entre sus extremos es también igual a la unidad.

La unidad práctica de resistencia u ohmio es la resistencia recorrida por una corriente de un amperio cuando la diferencia de potencial entre sus extremos es un voltio.

Como el voltio vale $\frac{1}{300}$ de unidad electrostática y el amperio 3.10^9 unidades electrostáticas, el ohmio vale $\frac{1}{9.10^{11}}$ de unidad electrostática.

Como la importancia práctica de la unidad de resistencia es considerable, se ha intentado hacer una representación de la misma, y una

vez conseguida, se ha adoptado como unidad, de la misma forma que la unidad de longitud es la longitud del metro patrón. El ohmio patrón se ha definido como *la resistencia que ofrece a una corriente eléctrica constante una columna de mercurio, a la temperatura del hielo fundente, de sección constante, de masa 14,4521 gramos y de longitud 106,300 centímetros.*

Existen reproducciones comerciales de este patrón.

La unidad de resistividad electrostática C. G. S. se define de la forma siguiente: *un cuerpo posee una resistividad igual a la unidad cuando un conductor de la misma naturaleza que este cuerpo, de un centímetro de longitud y un centímetro cuadrado de sección, posee una resistencia igual a la unidad electrostática C. G. S.*

Los técnicos utilizan el *ohmio centímetro* o el *microohmio centímetro*, que se definen respectivamente como *la resistividad de un cuerpo tal, que un conductor de la misma materia, de un centímetro de longitud y un centímetro cuadrado de sección, posee una resistencia de 1 ohmio*, y el segundo como la millonésima parte del que se acaba de definir.

Estas unidades, como no pertenecen a ningún sistema, sólo pueden utilizarse en la fórmula

$$R = \rho \frac{l}{s}.$$

Se indican a continuación los valores de la resistividad ρ para algunos metales y aleaciones usuales, así como para ciertos aisladores, a la temperatura ordinaria.

CUERPOS	ρ EN MICROOHMIOS-CM
Plata	1,5
Cobre	1,6
Hierro	11
Aluminio	2,8
Mercurio	94,076
Plata alemana	30
Constantán	49
Petróleo	2×10^{20}
Caucho	10^{21}

La unidad práctica es el **ohmio-metro.**

Reóstatos. Cajas de resistencias. — Para que varíe la intensidad de una corriente, basta, con arreglo a la ley de Ohm, cambiar la resistencia del circuito que recorre. Con este objeto se han construido resistencias variables, denominadas *reóstatos*. La figura 420 es el esquema de uno de estos aparatos, constituido por una resistencia arrollada en espiral en un cilindro de materia aislante. Encima del cilindro y paralelamente a su eje se dispone una reglilla conductora, sobre la que se desliza un cursor C, cuya punta se apoya sobre la resistencia. La corriente atraviesa el reóstato entrando por E y saliendo por S, pasando por el cursor y una parte de la reglilla. Cuando se desliza el cursor hacia la izquierda, la resistencia disminuye, aumentando en el caso contrario. La figura 421 es el esquema de otro tipo de reóstato denominado *potenciómetro*. Las clavijas (1, 2, 3...) son pequeñas piezas de cobre, entre las cuales se colocan las resistencias R_1, R_2, R_3, etc. Una manilla o manubrio M conductor, móvil alrededor de un eje O, puede apoyarse sucesivamente en cada una de dichas piezas. La corriente entra por la pieza 1 y sale por el eje O, atravesando el manubrio. Cuando se desplaza el manubrio hacia la derecha, la resistencia aumenta, disminuyendo en el caso contrario.

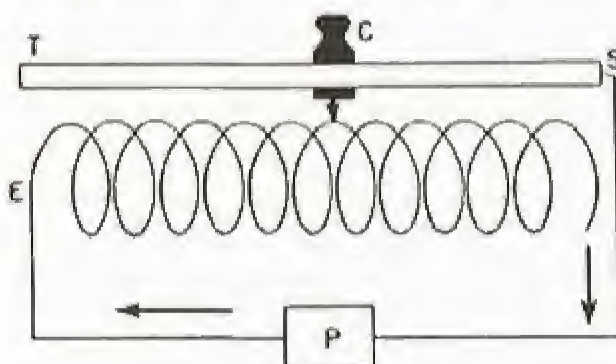


Fig. 420

Como las resistencias de estos aparatos son mal conocidas y además variables, para las mediciones de precisión que exigen el conocimiento exacto de las resistencias se utilizan resistencias graduadas, reunidas en cajas de resistencias. Conforme se van quitando una serie de clavijas, se va introduciendo en el circuito resistencias de 1 ohmio, 1 + 2 ohmios, 1 + 2 + 2 ohmios, 1 + 2 + 2 + 5 ohmios, etc., análogamente a como en una balanza se van colocando 1 gramo, 1 + 2 gramos, etcétera.

Estas resistencias se construyen en una aleación cuya resistencia varíe poco con la temperatura.

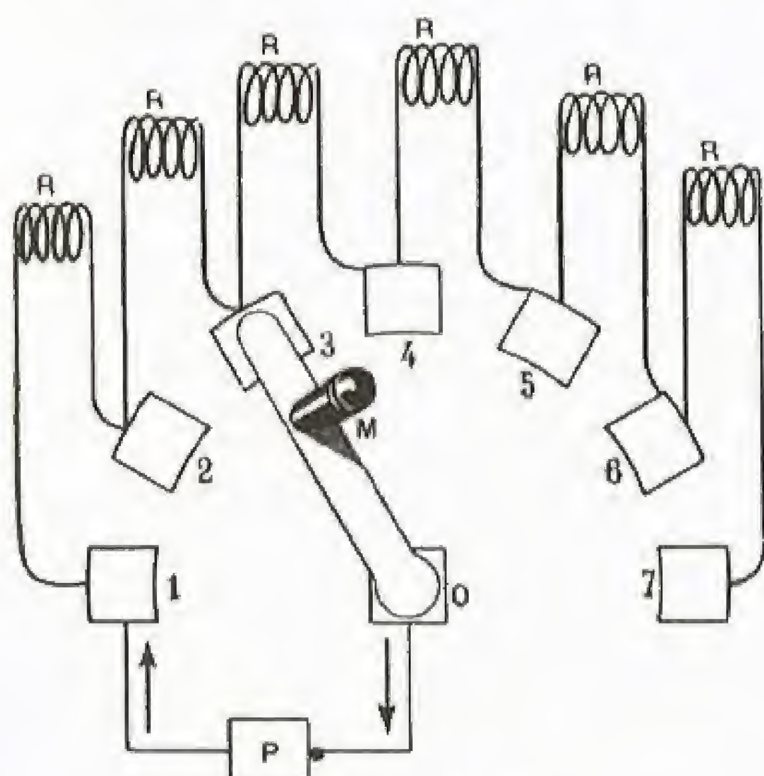


Fig. 421

Variación de la resistividad con la temperatura y los diferentes agentes. — La resistividad de un cuerpo varía con la temperatura, como ya se ha indicado (v. pág. 122). Estudiaremos primeramente el caso de los metales puros, para los cuales la variación de resistividad a temperaturas sensiblemente superiores a — 273° C puede expresarse bastante bien mediante la ecuación

$$\rho = \rho_0 (1 + at),$$

en donde ρ es la resistividad a la temperatura t, ρ_0 la resistividad a cero grados y a un coeficiente que es *sensiblemente el mismo para todos los metales*, y cercano a $\frac{1}{273}$, que es el coeficiente de dilatación de los gases a presión constante.

Si se quiere obtener una aproximación mejor, debe emplearse la ecuación

$$\rho = \rho_0 (1 + at + bt^2)$$

o incluso

$$\rho = \rho_0 (1 + at + bt^2 + ct^3).$$

Cualquiera que sea esta ley, la resistividad de un metal puede medirse para diversas temperaturas, e inversamente deducir la temperatura por el conocimiento de la resistividad. Éste es el principio de los *termómetros de resistencias.*

Para temperaturas muy bajas, próximas al cero absoluto, la resistividad de ciertos cuerpo es menor que cualquier valor medible, fenómeno denominado supraconductividad. En estas condiciones, la corriente que atraviesa tal conductor cerrado sólo desaparece al cabo de un período de tiempo muy largo (varias horas). La temperatura a la que se produce el fenómeno es diferente según los conductores que se utilicen. El nitruro de columbio se hace supraconductor a — 259° C, el plomo a — 266° C y el cinc a — 272° C.

La variación de la resistividad de las aleaciones con la temperatura no obedece a las mismas leyes que las de los metales puros. Hay aleación como el constantán (60 por ciento de cobre y 40 por ciento de níquel) cuya resistividad depende poco de la temperatura: las resistencias graduadas se construyen de constantán.

Ciertos cuerpos tienen una resistividad que disminuye mucho al elevarse la temperatura, como las mezclas de óxido magnético de hierro con cuerpos como el cromato de magnesio. Cuando la temperatura aumenta a 30° C la resistividad puede dividirse por tres.

La resistividad puede también variar con otros agentes diferentes de la temperatura: la resistencia del selenio disminuye cuando se le ilumina fuertemente, y la del bismuto aumenta cuando se le coloca en un campo magnético.

Teoría de la resistencia. — La corriente eléctrica es debida a un desplazamiento de electrones, que son las cargas eléctricas elementales, constituyentes de los átomos (v. TEORÍAS MODERNAS, pág. 151). Se cree que el paso de la corriente se manifiesta por una traslación de electrones de un átomo a otro. Como la agitación molecular dificulta este desplazamiento, la resistividad debe aumentar cuando aumenta la temperatura y ser nula cuando cesa la agitación molecular, es decir, en el cero absoluto. Como los electrones están cargados negativamente, el sentido adoptado para la circulación de la corriente es, en realidad, el contrario del que tiene realmente.

Efectos caloríficos de la corriente. Ley de Joule. Fuerzas electromotriz y contraelectromotriz

Efectos caloríficos de la corriente. Ley de Joule. — Una experiencia sencilla puede poner de manifiesto el hecho ya mencionado de que un conductor se calienta al ser recorrido por una corriente eléctrica; cuando una corriente de unos pocos amperios atraviesa un alambre de hierro, este alambre se pone al rojo y puede llegar a fundirse.

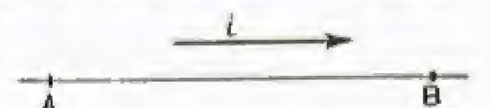


Fig. 422

Esta energía calorífica se debe a la transformación de la energía eléctrica y es fácil de calcular. Sea un conductor lineal AB (*fig.* 422) recorrido por una corriente de intensidad i, entre cuyos extremos hay una diferencia de potencial $V_A - V_B$. Del potencial V_A al potencial V_B pasa una cantidad de electricidad i por segundo, y la energía liberada vale $(V_A - V_B)i$; en t segundos la energía liberada es

$$W = (V_A - V_B)it$$

y la cantidad de calor que se desprende es

$$Q = \frac{W}{J} = \frac{(V_A - V_B)it}{J},$$

siendo J el equivalente mecánico de la caloría. Como, en virtud de la ley de Ohm, $V_A - V_B = Ri$, siendo R la resistencia de AB, se tendrá

$$Q = \frac{R \times i \times it}{J} = \frac{Ri^2t}{J}$$

o

$$JQ = W = Ri^2t,$$

lo que se expresa diciendo:

La cantidad de calor que desprende un conductor al ser atravesado por una corriente continua es proporcional a la resistencia del conductor, al tiempo que emplea la corriente en atravesarlo y al cuadrado de la intensidad de esta corriente.

Esta ley se denomina *ley de Joule*, que fue quien la descubrió.

Si se expresa R en ohmios, i en amperios y t en segundos, la energía será expresada en joules. Si se utilizan las unidades electrostáticas C. G. S., la energía será expresada en ergios, ya que el joule, que vale 10^7 ergios, es la unidad práctica de trabajo.

Aplicaciones del efecto calorífico de la corriente. — Las aplicaciones del efecto calorífico de la corriente son muy numerosas. Citemos entre ellas:

1º Las lámparas eléctricas, constituidas por un filamento de tungsteno, encerrado en una ampolla de vidrio que contiene un gas inerte (nitrógeno, argón). La corriente hace que el filamento se ponga incandescente, a causa de la gran resistencia que le ofrece. El metal escogido es el tungsteno, porque sólo se funde a temperaturas superiores a 3 000° C, expulsándose el aire de la ampolla para evitar la formación de óxido, que podría romper el filamento;

2º Los radiadores, hervidores y planchas eléctricas, que no utilizan más que resistencias convenientemente escogidas;

3º Los fusibles (o plomos) o cortocircuitos. Cuando a causa de un accidente, como la disminución brusca de una resistencia (cortocircuito), la intensidad de una corriente llega a ser muy grande, ciertas partes del circuito pueden ponerse al rojo e incendiar la instalación. Para evitar este peligro, se interponen en el circuito conductores de una aleación fusible de resistencia adecuada; cuando la intensidad llega a ser muy grande, el hilo se calienta, se funde y corta la corriente antes de que pueda producirse ningún daño. Estos cortocircuitos se encuentran en todas las instalaciones domésticas y son comúnmente designados por el nombre de *plomos;*

4º Los amperímetros térmicos, que se exponen a continuación.

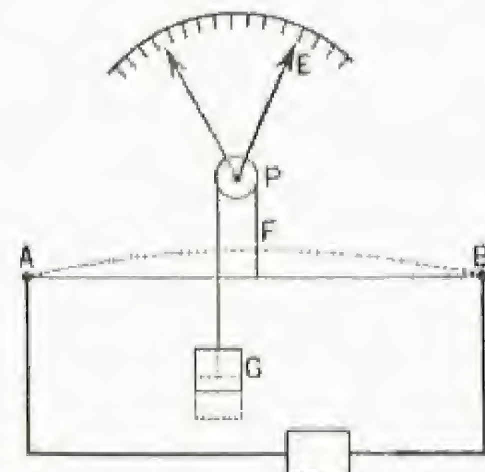


Fig. 423

Amperímetros térmicos. — Bajo el efecto de la corriente, un conductor se calienta y, por consiguiente, se dilata. Cuanto mayor es la intensidad, más se calienta y, por consiguiente, su dilatación permite medir la intensidad de la corriente que lo atraviesa. Tal es el principio de los amperímetros térmicos. La figura 423 es el esquema de uno de estos aparatos. En el punto medio del conductor AB se fija un hilo F no conductor, que pasa por una polea P, solidaria de una aguja E; el hilo F se mantiene tenso por la acción de un peso G. Al alargarse el hilo conductor, el peso G desciende, y hace que la polea gire en el sentido inverso de las agujas de un reloj, arrastrando la aguja E. Para que este aparato se convierta en un instrumento de medida, basta con colocar ante la aguja E una graduación, establecida haciendo pasar por AB corrientes de intensidades conocidas.

El calor que se desprende es proporcional al cuadrado de la intensidad; el alargamiento del hilo es también función de este cuadrado, y lo mismo ocurre con el desplazamiento de la aguja; el inconveniente de este aparato es que las divisiones están muy próximas en el lado de las intensidades pequeñas. Por lo general, un amperímetro se gradúa poniéndole en circuito con un voltámetro de nitrato de plata, una batería de acumuladores y un reóstato. Se señala el punto donde se detiene la aguja, y se mide la intensidad de la corriente en amperios según la masas de plata depositada en un tiempo dado. De esta forma se determinan cierto número de puntos de la graduación. Valiéndose de un amperímetro graduado, puede graduarse fácilmente otro amperímetro. Estos dos aparatos se ponen en serie en un mismo circuito.

Características de una fuente de electricidad. Fuerza electromotriz. — Una fuente de electricidad puede considerarse (pág. 402) como una parte del circuito, con la diferencia de que eleva las cantidades de electricidad que la atraviesan desde el potencial V' al potencial V. Se denominan polos de la fuente, o también *bornes*, los puntos de entrada y de salida de la corriente; el *polo positivo* es el de potencial más elevado y el otro el *polo negativo*. En el exterior de la fuente o del generador la corriente va del polo positivo P al polo negativo N (*fig.* 424) y en el interior va del polo negativo al polo positivo. El generador, que debe considerarse como una parte cualquiera del circuito, debe tener una resistencia, que ha recibido el nombre de *resistencia interior del generador*, para distinguirla de la resistencia exterior del circuito. La fuente de electricidad, que tiene una resistencia, se calienta y aparece bajo forma de calor la energía ri^2 por segundo; al mismo tiempo, en el circuito exterior aparece la energía Ri^2, siendo R la resistencia de este circuito. La energía total por segundo es, pues, $Ri^2 + ri^2$, energía que es evidentemente la suministrada por la fuente. Como esta energía es proporcionada *por segundo*, se dirá que la potencia P de la fuente es

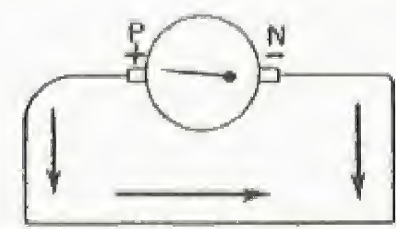


Fig. 424

$$P = Ri^2 + ri^2.$$

Esta potencia puede expresarse cómodamente, como veremos más adelante, por

$$P = ei;$$

e es la fuerza electromotriz de la fuente, f. e. m., abreviadamente, y se define como: *cociente entre la potencia proporcionada por el generador y la intensidad de la corriente que lo atraviesa.* También se tiene

$$e = (R + r)i,$$

fórmula que presenta una gran analogía con la de la ley de Ohm: $V_A - V_B = Ri$, de donde se concluye que la *f. e. m. se expresa con las mismas unidades que una diferencia de potencial.* La ley que expresa la fórmula anterior se conoce por el nombre de *ley de Ohm generalizada para un circuito cerrado.* Su enunciado es el siguiente: *la f. e. m. de un generador es igual al producto de la intensidad de la corriente que lo atraviesa por la resistencia total del circuito.*

La noción de f. e. m. presenta un gran interés porque muy frecuentemente es independiente de la intensidad de la corriente que atraviesa el generador, constituyendo entonces una magnitud característica del generador. Una vez conocida, así como la resistencia interior, podrá calcularse la intensidad de la corriente que atraviesa una resistencia dada.

La diferencia de potencial en los bornes $V_P - V_N$ no es, como la f. e. m., una cantidad característica del generador, puesto que

$$V_P - V_N = Ri,$$

de donde, puesto que $e = Ri + ri,$

$$V_P - V_N = e - ri;$$

e y *r* son característicos del generador; *i* es una cantidad variable. La diferencia de potencial en los bornes es inferior a la f. e. m. y sólo es igual cuando la intensidad *i* es nula. Esta última observación se aplica al medir las f. e. m. por el método de oposición.

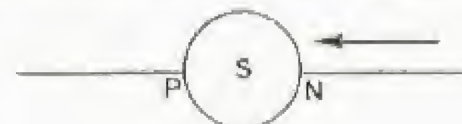


Fig. 425

Para calcular la diferencia de potencial entre los puntos N y P, se considera la parte de circuito que comprende la fuente S de electricidad (*fig.* 425); no es posible aplicar la ley de Ohm ordinaria, pero como $V_P - V_N = e - ri$, se tendrá:

$$V_N - V_P = ri - e.$$

Esta es la *ley de Ohm generalizada para una parte del circuito que contenga una fuente de electricidad.*

Esta fórmula se explica con gran sencillez: a causa de la resistencia *r* del generador, se produce una caída de potencial *ri*, pero, por otra parte, este generador eleva el potencial una cantidad *e*, y por consiguiente la caída de potencial será igual a $ri - e$.

Receptores. Fuerza contraelectromotriz. — Hay aparatos que transforman la energía eléctrica en otra energía diferente de la energía calorífica. Por ejemplo, los motores eléctricos absorben energía eléctrica y proporcionan energía mecánica. Estos aparatos, de los que citaremos otros ejemplos más adelante, se denominan *receptores*.

Sea un receptor M (*fig.* 426), un motor por ejemplo; la corriente penetra en él por un borne, A, y sale por el otro, B. Si $V_A - V_B$ es la diferencia de potencial entre ambos bornes, e *i* la intensidad de la corriente, el receptor M absorberá una potencia

$$P' = (V_A - V_B)i.$$



Fig. 426

Esta potencia se utiliza con dos fines: una parte de ella aparece en forma de calor debido a la resistencia R' del receptor, y es igual a $R'i^2$. Otra parte es restituida en forma de energía mecánica o de otro tipo; por analogía con los generadores, esta segunda fracción puede ponerse en la forma $e'i$. Se tendrá, pues,

$$P' = (V_A - V_B)i = ei + R'i^2;$$

e' se designa por el nombre de *fuerza contraelectromotriz* del receptor, *f. c. e. m.*, abreviadamente. Puede definirse como el *cociente entre la potencia eléctrica transformada por el receptor y la intensidad de la corriente.*

En virtud de la fórmula anterior se tiene

$$V_A - V_B = R'i + e',$$

lo que expresa la *ley de Ohm generalizada a una parte del circuito que contiene un receptor.*

Supongamos dos generadores de f. e. m. *e* y *e'* en un mismo circuito (*fig.* 427); como cada uno de ellos tiende a hacer pasar la corriente en sentido inverso del otro, diremos que los generadores están montados en *oposición*. Supongamos que es más fuerte la corriente del primero de los generadores, y calculemos la diferencia de potencial $V_{P'} - V_{N'}$ en los bornes del segundo. Como la f. e. m. de este último es *e'*, cualquier cantidad de electricidad que lo atraviese sufrirá una caída de potencial *e'*; si *i* es la intensidad de la corriente, el generador en oposición absorbe una potencia *e'i*, además de la potencia *r'i* debida a su resistencia. *El generador en oposición se conduce como un receptor, y tiene una f. c. e. m. igual a su f. e. m.* Por consiguiente,

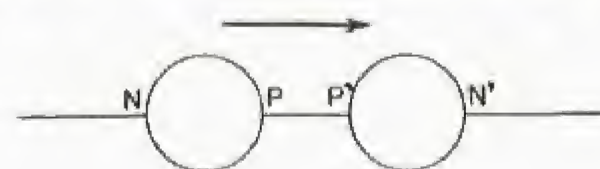


Fig. 427

$$V_{P'} - V_{N'} = e' + r'i.$$

Estas consideraciones demuestran, sin necesidad de insistir, que una f. c. e. m. se expresa con las mismas unidades que una f. e. m.

Generalización de la ley de Ohm. — La diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito se expresa por

$$V_A - V_B = Ri$$

cuando la porción del circuito sólo tiene una resistencia; por

$$V_A - V_B = ri - e$$

cuando la porción del circuito contiene un generador, y por

$$V_A - V_B = R'i + e'$$

cuando la porción del circuito contiene un receptor o un generador en oposición. Estas tres fórmulas pueden condensarse en una fórmula única si convenimos en *contar positivamente las f. e. m. y negativamente las f. c. e. m.* Esta fórmula única es

$$V_A - V_B = Ri - e.$$

Puede comprobarse fácilmente que esta fórmula da las tres anteriores si se hace

$$e = 0, \quad e = e, \quad e = -e'.$$

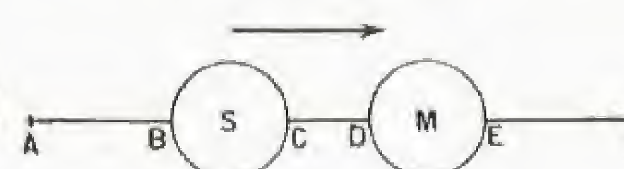


Fig. 428

Consideremos una parte del circuito que contenga las resistencias ABCD, EF (*fig.* 428), respectivamente iguales a R_1, R_2; una fuente de electricidad S de f. e. m. *e* y

de resistencia r, y un receptor M de f. c. e. m. e' y de resistencia r'. Calculemos la diferencia de potencial $V_A - V_F$. Se tiene

$$V_A - V_B = R_1 i, \quad V_B - V_C = ri - e, \quad V_C - V_D = R_2 i,$$
$$V_D - V_E = r' i + e', \quad V_E - V_F = R_3 i.$$

De donde, sumando miembro a miembro,

$$V_A - V_F = R_1 i + R_2 i + R_3 i + ri + r'i + e' - e.$$

Esta fórmula puede generalizarse para una parte cualquiera del circuito, escribiendo

$$V_A - V_F = \Sigma Ri - \Sigma e;$$

el signo Σ (sigma) significa que deben sumarse todas las cantidades análogas a las que siguen a dicho signo. Así, ΣRi quiere decir que se suman todos los productos de las resistencias por la intensidad; Σe indica que se suman todas las f. e. m. y f. c. e. m., cuidando, evidentemente, de contar las primeras positivamente y las segundas negativamente. Esta fórmula así establecida es la *ley de Ohm* generalizada y nos permite calcular la diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera de un circuito.

Corrientes derivadas
Medición de resistencias y de f. e. m.

Corrientes derivadas. — Hasta ahora sólo se han estudiado circuitos sencillos, es decir, tales que entre dos puntos A y B de los mismos sólo existe un circuito único. Estudiemos ahora lo que sucede si se colocan entre los puntos A y B varios conductores lineales, por ejemplo tres, ACB, ADB, AEB (*fig.* 429); se dice entonces que los tres conductores están *en derivación*. Si r_1, r_2, r_3 son las resistencias de los tres conductores, i_1, i_2, i_3 las intensidades e I la intensidad en la parte del circuito que no está bifurcada, al punto A llegará por segundo una cantidad I de electricidad, que saldrá por el punto B; por consiguiente, por los tres conductores pasa, en total, una cantidad I de electricidad, mientras que por el primero pasa i_1, por el segundo i_2 y por el tercero i_3. Se tendrá, pues,

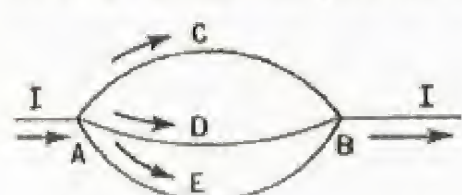


Fig. 429

$$I = i_1 + i_2 + i_3.$$

Por otra parte, a cada uno de estos conductores en derivación puede aplicársele la ley de Ohm, con lo que se tendrá

$V_A - V_B = r_1 i_1$, $V_A - V_B = r_2 i_2$, $V_A - V_B = r_3 i_3$, de donde $r_1 i_1 = r_2 i_2 = r_3 i_3$, o

$$\frac{i_1}{\frac{1}{r_1}} = \frac{i_2}{\frac{1}{r_2}} = \frac{i_3}{\frac{1}{r_3}} = \frac{i_1 + i_2 + i_3}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}} = \frac{I}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}},$$

lo que permite calcular las intensidades de cada uno de los conductores:

$$i_1 = \frac{I \times \frac{1}{r_1}}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}}, \text{ etc.}$$

Estas fórmulas muestran que *las intensidades de la corriente eléctrica en conductores en derivación son inversamente proporcionales a las resistencias de los conductores.* Por ejemplo, si las resistencias están entre sí en la misma relación que los números 1, 2 y 3, las intensidades estarán entre sí en la misma relación que los números 1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$.

Con frecuencia es muy cómodo utilizar *la resistencia equivalente* a las tres (o más) resistencias en derivación, es decir, *la resistencia que colocada entre* A *y* B *no modificaría la diferencia de potencial entre estos dos puntos.*

Sea R esta resistencia equivalente; es recorrida por la corriente I y se tendrá $V_A - V_B = RI$, de donde

$$RI = r_1 i_1 = \frac{I}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}}, \text{ o sea } R = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}},$$

o también

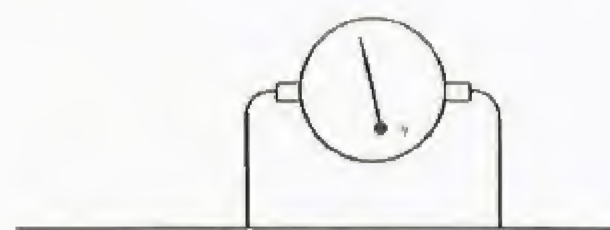
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}.$$

La inversa de la resistencia equivalente es igual a la suma de las inversas de las resistencias en derivación.

Si se conviene en llamar *conductancia* a la inversa de la resistencia podrá decirse:

La conductancia equivalente es la suma de las conductancias en derivación.

Shunts. — Supongamos que quiere medirse una corriente del orden de 100 amperios, y que se dispone de un amperímetro —amperímetro térmico, por ejemplo— cuya graduación se detiene a los 20 amperios. Para ello, se pondrá una resistencia (*fig.* 430) en derivación con el amperímetro, a fin de que sólo pase por él una fracción de la corriente que hay que medir. Esta resistencia, así colocada con respecto a un aparato de medida, se denomina *shunt*. Si la resistencia del shunt es de 1 ohmio, y la del amperímetro de 9 ohmios, la intensidad de la corriente que atraviesa el amperímetro es 9 vece más pequeña que la que atraviesa el shunt y, por consiguiente, será $\frac{1}{10}$ de la intensidad que hay que medir. Si el amperímetro marca 10 amperios, la intensidad total será de 100 amperios. Si se colocan shunts cuyas resistencias son 99, 999, etc., veces menores que las del amperímetro, éste sólo recibirá


Fig. 430

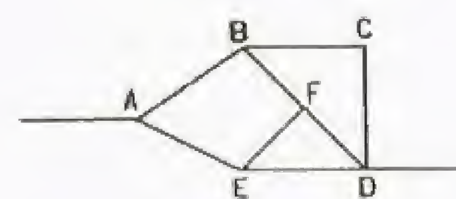


Fig. 431

una centésima o una milésima de la intensidad total.

Los amperímetros de precisión, que son aparatos frágiles, van siempre provistos de estos shunts.

Leyes de Kirchhoff. — Pueden imaginarse circuitos más complicados, como el de la figura 431. Los puntos A, B, etc., en los cuales desembocan varios conductores, se llaman *nudos*, y los circuitos cerrados como BCD, ABFE, etc., se denominan *mallas*. Las intensidades de la corriente en cada parte del circuito, por muy complejo que éste sea, pueden calcularse gracias a leyes sencillas debidas a Kirchhoff. Estas leyes son dos, la primera sobre los nudos y la segunda sobre las mallas.

En un nudo del circuito, ciertas corrientes aportan electricidad, mientras que otras la sustraen. Es evidente que la cantidad de electricidad aportada es igual a la sustraída, lo que constituye la primera ley de Kirchhoff, que se expresa:

La suma de las intensidades de las corrientes que afluyen a un nudo es igual a la suma de las intensidades que se alejan del mismo.

Esta ley puede expresarse por una fórmula algebraica sencilla, contando positivamente las intensidades de las corrientes que se alejan y negativamente las intensidades de las corrientes que se dirigen al nudo. Se escribirá: $\Sigma i = 0$.

El signo Σ significa que las intensidades se suman algebraicamente.

Consideremos ahora una malla como BCD (*fig.* 432). Se tendrá, evidentemente,

$$V_B - V_C + V_C - V_D + V_D - V_B = 0.$$

Si r_1, r_2, r_3 son las resistencias de los conductores BC, CD, DB y i_1, i_2, i_3 las intensidades de las corrientes que circulan como indica la figura, se tendrá

$$V_B - V_C = r_1 i_1, \quad V_C - V_D = r_2 i_2, \quad V_D - V_B = -r_3 i_3,$$

de donde

$$r_1 i_1 + r_2 i_2 - r_3 i_3 = 0.$$

Si se conviene un sentido determinado para el recorrido de la malla, el sentido BCD, por ejemplo, y en contar positivamente los productos ri cuando se va en el sentido de la corriente y negativamente en el sentido contrario, la relación anterior podrá escribirse

$$\Sigma ri = 0.$$

Es la segunda ley de Kirchhoff, que se expresa:

La suma algebraica de los productos de la resistencia de cada conductor de una malla por la intensidad de la corriente que la atraviesa es nula.

Fig. 432

Si la malla anterior es recorrida en el sentido BDC, se obtendrá

$$r_3 i_3 - r_2 i_2 - r_1 i_1 = 0,$$

que es la igualdad obtenida anteriormente.

Esta segunda ley de Kirchhoff sólo se aplica cuando la malla no contiene generador ni receptor, ya que de lo contrario habría que aplicar la ley de Ohm generalizada:

$$\Sigma ri - \Sigma e = 0,$$

con los convenios algebraicos precedentemente establecidos.

Medición de resistencias. Puente de Wheatstone. — Para medir una resistencia se realiza el circuito esquematizado en la figura 434, del cual se conocen las resistencias r_1, r_2, r_3 de los conductores AB, BC, AD, siendo la resistencia x del conductor CD la que hay que medir. Entre los puntos B y D se establece un puente formado por un conductor en el que se ha colocado un aparato G de medida de las intensidades; S es un generador de electricidad. Este sistema se denomina puente de Wheatstone. Para efectuar la medición se varían las resistencias r_1, r_2, r_3 hasta que la intensidad en el puente BD sea nula, lo que se comprueba mediante el aparato G. Supongamos satisfecha esta condición, y sean i_1, i_2, i_3, i_4 las intensidades de la corriente en los diversos conductores. Observemos en primer lugar que $i_1 = i_2$ y que $i_3 = i_4$ puesto que la intensidad en BD es nula, y después que la diferencia de potencial $V_B - V_D$ es nula por la misma razón. Se tendrá, pues,

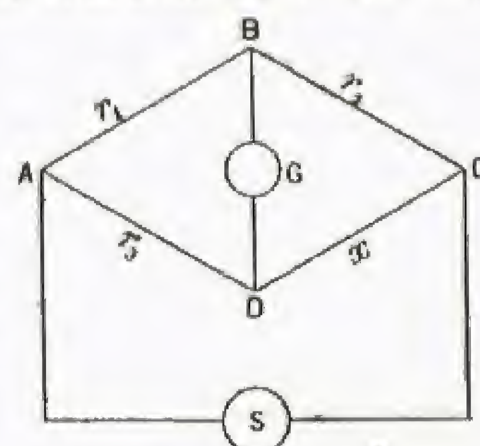


Fig. 433

$$V_A - V_B = V_A - V_D, \qquad V_B - V_C = V_D - V_C,$$

o

$$r_1 i_1 = r_3 i_3, \qquad r_2 i_1 = x i_3;$$

dividiendo miembro a miembro se tendrá

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_3}{x},$$

de donde

$$x = r_2 \times \frac{r_3}{r_1}.$$

Conociendo r_1, r_2, r_3 se deduce x. Las resistencias r_1, r_2 y r_3 se toman en general sobre las cajas de resistencias. El método es de gran precisión, ya que más adelante estudiaremos aparatos que permiten verificar con toda exactitud que la corriente en BD es nula.

Medición de f. e. m. por el método de oposición. — Para medir una f. e. m. se realiza el circuito cuyo esquema indica la figura 434. S es una fuente de f. e. m. constante; S′ es la fuente cuya f. e. m. quiere medirse, montada en oposición con S; G es un aparato de medición de intensidades, y C un punto móvil sobre el conductor AB. Para efectuar la medición, se desplaza el punto C hasta que el aparato G indique una intensidad nula. Como la intensidad es nula en el circuito AS′C, la diferencia de potencial en los bornes de S′ es igual a su f. e. m. e_1, con arreglo a la observación hecha. Esta diferencia de potencial es igual a $V_A - V_C$, ya que las diferencias de potencial entre los bornes y los puntos A y C son nulas, al serlo la corriente (ley de Ohm). Se tendrá, pues,

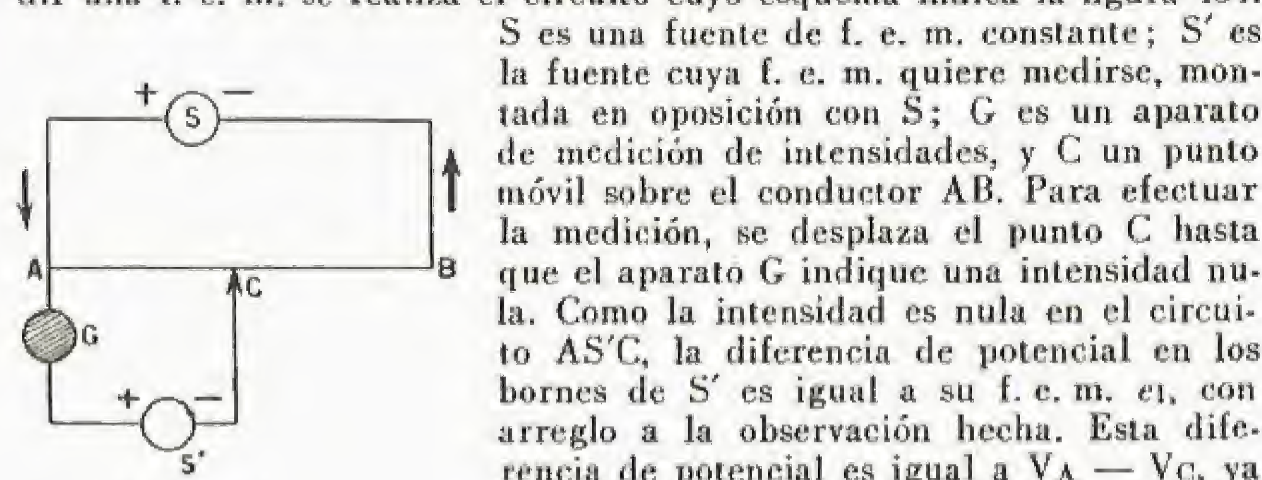


Fig. 434

$$e_1 = V_A - V_C.$$

Sean R_1 la resistencia de AC, e I la intensidad de la corriente: se tendrá

$$V_A - V_C = R_1 I,$$

de donde

$$e_1 = R_1 I.$$

Reemplacemos la fuente S′ por una fuente S″ de f. e. m. conocida e_2, y se tendrá, análogamente,

$$e_2 = R_2 I;$$

la intensidad es la misma que en el primer caso, ya que tanto en un caso como en otro el generador S alimenta el mismo circuito SAB. Dividiendo miembro a miembro las dos igualdades obtenidas, se tendrá

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{R_1}{R_2}, \quad \text{de donde} \quad e_1 = e_2 \frac{R_1}{R_2}.$$

El conocimiento de los valores de R_1 y R_2 implica el de e_1. En las medidas de precisión, las resistencias R_1 y R_2 se toman en cajas de resistencia de forma que la resistencia de AB permanezca constante.

Este método, como el del puente de Wheatstone, exige que la intensidad de la corriente sea nula en ciertas partes del circuito, por lo que se denominan *métodos de cero.*

Electrólisis. Acumuladores

Electrólisis. Leyes cualitativas. — Muestra la experiencia que una sal, una base o un ácido, fundidos o disueltos en agua, son conductores de la corriente eléctrica, y que al mismo tiempo son descompuestos por ella. El cloruro de sodio, por ejemplo, fundido, se descompone bajo el efecto de la corriente en cloro y en sodio, y el agua acidulada se descompone en oxígeno e hidrógeno. Este fenómeno ha recibido el nombre de *electrólisis* y los cuerpos que lo presentan el de *electrólitos.*

Coloquemos un electrólito en un recipiente, en el que se sumergen dos láminas conductoras A y C (*fig.* 435), denominadas *electrodos*, que servirán para introducir la corriente. El electrodo A, por el que llega la corriente, se llama *ánodo*, y el electrodo C, de salida de la corriente, *cátodo*. El aparato recibe el nombre de *voltámetro*. Cualquiera que sea el electrólito que se emplee, se comprueba que los *productos de descomposición de la electrólisis aparecen siempre sobre los electrodos y nunca en el propio líquido.*

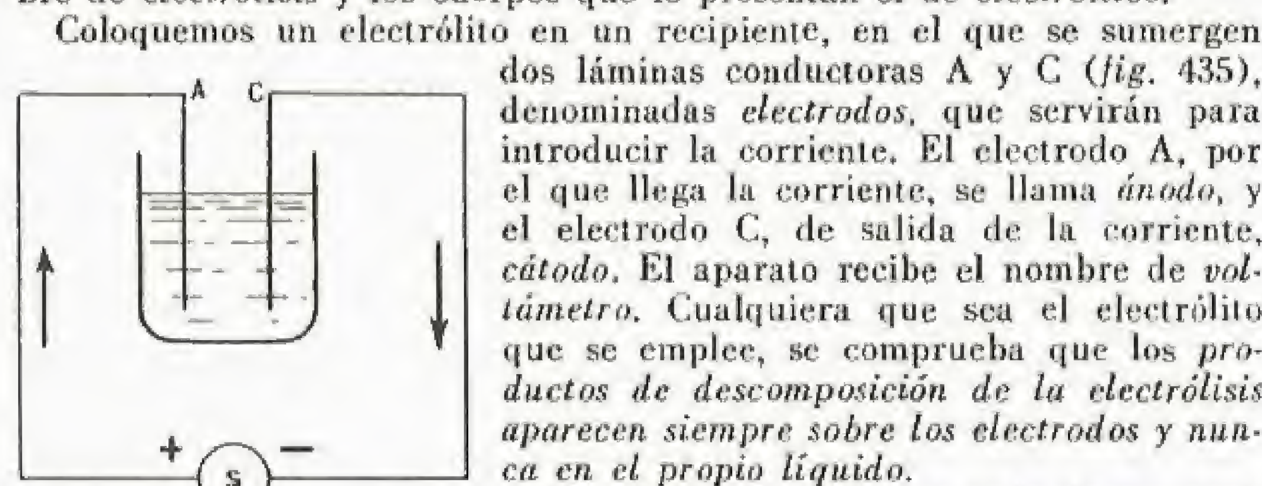


Fig. 435

Al estudiar los productos de descomposición se comprueba que en el cátodo aparece siempre un metal o hidrógeno. Esto se explica diciendo que la molécula del electrólito se descompone en dos partes: una constituida por el metal de la sal o de la base, o por el hidrógeno del ácido, y la otra por el resto de la molécula. Así, el cloruro de sodio ClNa se descompone en sodio Na y cloro Cl, y el ácido sulfúrico SO_4H_2 en hidrógeno H_2 y en el radical SO_4.

Estas dos partes del electrólito se denominan *iones*, siendo el *catión* el que aparece en el cátodo y el *anión* el que aparece en el ánodo.

Ocurre con mucha frecuencia que los aniones y los cationes reaccionan, ya con la molécula entera, ya con el solvente. Estas reacciones se llaman *secundarias*; cuando se producen, se ve aparecer sobre los electrodos no los iones primitivos, sino el cuerpo que resulta de las reacciones secundarias. Por ejemplo, la electrólisis del cloruro de sodio fundido da sodio y cloro; no hay reacción secundaria, pero en la electrólisis del cloruro de sodio disuelto, el sodio actúa sobre el agua con arreglo a la ecuación



$$Na + H_2O \rightarrow NaOH + H;$$

se está en presencia de una reacción secundaria, apareciendo en el cátodo hidrógeno y no sodio. Análogamente, en la electrólisis del ácido sulfúrico el ion SO_4 actúa sobre el agua:



$$SO_4 + H_2O \rightarrow SO_4H_2 + O,$$

de forma que lo que se ve aparecer en el ánodo es oxígeno. Lo mismo ocurre en la electrólisis del sulfato de sodio; los dos iones primitivos son el radical SO_4 y el sodio; el primero produce en el ánodo ácido sulfúrico y oxígeno, y el segundo en el cátodo sodio e hidrógeno. Con un papel de tornasol se puede comprobar que el líquido es ácido en el ánodo y básico en el cátodo.

Los electrodos intervienen algunas veces en las reacciones secundarias. Si se electroliza, por ejemplo, sulfato de cobre con un ánodo de cobre, los iones primitivos son SO_4 y Cu. El segundo se deposita sobre el cátodo, mientras que el primero ataca el ánodo, produciendo sulfato de cobre,



$$SO_4 + Cu \rightarrow SO_4Cu.$$

El ánodo, en el que no aparece ningún producto, desaparece poco a poco, mientras que la masa del cátodo aumenta. Puede decirse que el ánodo se ha transportado al cátodo. Esto constituye el principio de la *galvanoplastia* y del *refinamiento electrolítico* de los metales.

Leyes cuantitativas. Leyes de Faraday. — Faraday comprobó que la masa del electrólito descompuesto sólo dependía de la naturaleza química del electrólito, de la intensidad de la corriente y del tiempo durante el cual ha actuado esta última. La forma de los voltámetros y la de los electrodos, en particular, no intervienen en absoluto. Haciendo sucesivamente variar la intensidad de la corriente y el tiempo durante el cual actúa, Faraday llegó a la siguiente conclusión:

La masa de un electrólito determinado descompuesto por el paso de una corriente es proporcional a la intensidad de dicha corriente y al tiempo durante el cual actúa. Esto puede expresarse, si designamos por m la masa del electrólito descompuesto, por i la intensidad de la corriente, por t el tiempo y por k una constante,

$$m = k \times i \times t.$$

El producto $i \times t$ representa la cantidad de electricidad que ha atravesado el electrólito. Podrá entonces decirse: *la masa de un electrólito dado descompuesta por el paso de una corriente es proporcional a la cantidad de electricidad que ha atravesado el electrólito.*

Las masas de los productos de descomposición son, evidentemente, proporcionales a la masa del electrólito descompuesta; si m_1 es la masa de metal (o de hidrógeno) liberada por la corriente, se tendrá

$$m_1 = k_1 it.$$

Faraday comprobó que la constante k_1 era proporcional al átomo-gramo del metal (o del hidrógeno), e inversamente proporcional a su valencia:

$$k_1 = K \times \frac{M}{n},$$

en donde M es la masa atómica expresada en gramos del metal, n su valencia y K una constante que sólo depende de las unidades escogidas. El cociente $\frac{M}{m}$ ha recibido el nombre de *valencia-gramo*, y se dice que una corriente libera una valencia-gramo de metal cuando dicha corriente ha descompuesto una valencia-gramo en la molécula del electrólito.

Eliminando k_1 entre las dos igualdades anteriores, se tendrá

$$m_1 = K \times \frac{M}{n} \times it.$$

Para que la masa de metal liberada sea igual a $\frac{M}{n}$ habrá que hacer pasar por el electrólito una cantidad de electricidad it igual a $\frac{1}{K}$. Es decir, que para liberar una valencia-gramo de un metal por electrólisis, es necesario que pase una cantidad de electricidad $\frac{1}{K}$, que es la misma cualquiera que sea el metal. Esto constituye la segunda ley de Faraday, que se expresa más sencillamente diciendo:

La cantidad de electricidad necesaria para descomponer por electrólisis una valencia-gramo es independiente de la naturaleza del electrólito.

Si se toma como unidad el culombio, investigaciones de gran precisión han proporcionado para K el valor $\frac{1}{96\,490}$, lo que equivale a decir que 96 490 culombios liberan una valencia-gramo de cualquier metal. Así, pues, 96 490 culombios liberan $\frac{63{,}5}{2}$ gramos de cobre, 108 gramos de plata, etc. Cuando un metal tiene varias valencias, es necesario, evidentemente, tomar, en el cálculo de la valencia-gramo, la que tiene el metal en el electrólito utilizado.

Se designa frecuentemente con el nombre de *equivalente electroquímico* de un metal la *masa de este metal que se deposita por el paso de un culombio.* Si E es este equivalente electroquímico, se tendrá, evidentemente,

$$E = \frac{1}{96\,490} \times \frac{M}{n}.$$

Amperio internacional. — Dada la importancia de la unidad práctica de intensidad de corriente, el amperio, se ha procurado dar de ella una representación cómoda, para lo cual se ha recurrido a la electrólisis. Mediciones precisas han mostrado que el equivalente elec-

troquímico de la plata, es decir, la cantidad de plata liberada por un culombio, es igual a 0,001 118 gramos, por lo cual se ha definido el *amperio internacional* como *la intensidad de una corriente invariable que al pasar a través de una solución acuosa de nitrato de plata deposita 0,001 118 gramos de plata por segundo*. De esta forma es posible constituir, en cierto modo, un amperio-patrón.

Aplicaciones de la electrólisis. — La electrólisis se utiliza para depositar sobre ciertos cuerpos capas de diversos metales, tales como cobre, níquel, oro, cromo, plata: es la galvanoplastia. Ciertos metales se purifican por electrólisis, constituyendo el ánodo el metal impuro, el cátodo el metal puro y el electrólito una sal del metal; durante la electrólisis, el metal se deposita sobre el cátodo, y las impurezas en el fondo del aparato. Este es el refinamiento electrolítico de los metales.

La electrólisis se utiliza también para pulir ciertos metales. En este caso, el metal que hay que pulimentar es un ánodo soluble y el baño electrolítico se hace muy viscoso mediante la adición de substancias diversas, a fin de impedir las corrientes de convección. En estas condiciones, el paso de la corriente se hará de preferencia por las pequeñas asperezas del metal, que se disolverán. Estas pequeñas asperezas quedan suprimidas, y de aquí el pulimento. También se emplea la electrólisis para colorear el aluminio. Para ello, se provoca, mediante electrólisis, el depósito de una capa delgada de alúmina sobre el metal y se hace que esta alúmina adsorba un colorante. Mediante caldeo, la alúmina se endurece y se fija el color.

La industria química prepara por electrólisis cierto número de cuerpos como el sodio, el cloro, el hidrógeno, el aluminio, etc.

Teoría iónica. — Para explicar las leyes de la electrólisis, supuso Arrhenius que un electrólito disuelto o fundido está ya disociado en iones —al menos parcialmente— antes de que pase la corriente. Así, una solución de sal marina contendría iones sodio, iones cloro y moléculas completas de sal. Arrhenius admitió también que cada ion es portador de una carga eléctrica; naturalmente, la suma algebraica de las cargas de todos los iones es nula. Se supone, por último, que los cationes están cargados positivamente y los aniones negativamente. La electrólisis se explica entonces de la forma siguiente: cuando se hace pasar la corriente, se establece una diferencia de potencial entre los electrodos del voltámetro, creando entre los mismos un campo eléctrico que va del ánodo al cátodo. Los iones, que están electrizados, se desplazarán, los aniones hacia el ánodo y los cationes hacia el cátodo. Al llegar a los electrodos, los iones se descargan, se hacen neutros y sus propiedades químicas se manifiestan, lo que explica que los productos de descomposición sólo aparezcan en los electrodos. Por otra parte, el transporte de las cargas eléctricas por los iones explica el paso de la corriente.

Es fácil calcular la carga de un ion a partir de las leyes de Faraday. Tomemos el cloruro de sodio como ejemplo; es sabido que 96 490 culombios depositan 23 gramos de sodio, o, dicho de otra forma, 23 gramos de iones de sodio llevan una carga de 96 490 culombios. Si se admite que un átomo-gramo contiene $6{,}1.10^{23}$ átomos, la carga del ión sodio será de

$$\frac{96\,490}{6{,}1.10^{23}} = 1{,}60.10^{-19} \text{ culombios.}$$

Para el ion cobre bivalente se encontraría una carga doble, y para un ion trivalente una carga triple.

Se admite que la velocidad de desplazamiento de un ion es proporcional al campo eléctrico, denominándose *movilidad del ion* el coeficiente k de proporcionalidad; este coeficiente k expresa la resistencia que opone el líquido al desplazamiento del ion, y puede calcularse considerando el ion como una esfera pequeña de radio a, aunque también puede medirse por un método eléctrico que no expondremos aquí. Comparando los resultados obtenidos, se deduce el radio del ion, es decir, del átomo. De esta forma se ha encontrado que el ion potasio tenía un radio de 5.10^{-9} centímetros, es decir, cinco cienmilésimas de micra.

Polarización de los electrodos. — Un voltámetro absorbe energía eléctrica y restituye energía química; es un receptor y, por consiguiente, tiene una fuerza contraelectromotriz e, siendo la diferencia de potencial $V_A - V_C$ entre sus electrodos

$$V_A - V_C = ri + e.$$

Si interrumpimos la corriente, se comprueba que la diferencia de potencial $V_A - V_C$ no es nula, sino que conserva un valor próximo a e, fenómeno que puede ponerse de manifiesto observando que al reunir los electrodos por un hilo conductor se establece una corriente. El voltámetro se ha convertido en un generador cuyos electrodos son los polos; de aquí el nombre de *polarización de los electrodos* dado a este fenómeno. Obsérvese que la corriente así obtenida es de sentido inverso a la corriente que atraviesa primitivamente el voltámetro y que además es bastante breve, ya que tiene como efecto anular la diferencia de potencial $V_A - V_C$; *despolariza* los electrodos; de aquí su nombre de *corriente de despolarización*. La polarización de los electrodos se explica admitiendo una modificación de los mismos, o por lo menos de sus superficies; en el caso en que se producen desprendimiento gaseosos, se supone que una parte de los gases es adsorbida por los electrodos. Estas hipótesis pueden verificarse de la siguiente forma: retiremos el electrólito de un voltámetro polarizado, reemplazándolo por un electrólito que no se haya utilizado: la polarización subsiste y, por consiguiente, está localizada en los electrodos. Si se insufla aire cerca del cátodo de un voltámetro de agua acidulada polarizada, se observará cómo disminuye la polarización, ya que el oxígeno del aire insuflado oxida el hidrógeno retenido por el cátodo. Este fenómeno se produce lentamente cuando se abandona un voltámetro: hay *despolarización espontánea* de los electrodos.

No todos los voltámetros tienen f. c. e. m., ni tampoco todos se polarizan. Ya hemos visto que la electrólisis del sulfato de cobre con dos electrodos de cobre se reducía al transporte del ánodo al cátodo, sin que se manifieste ninguna energía (si los electrodos están al mismo nivel) ni por tanto f. c. e. m. ni polarización.

Electrólisis invisible. — Si entre los electrodos de un voltámetro polarizable se establece una diferencia de potencial inferior a la f. c. e. m., la corriente que pasa es nula, pero el voltámetro se polariza: ha habido, pues, una electrólisis suficiente solamente para modificar los electrodos y proporcionarles una f. e. m. de polarización igual a la diferencia de potencial establecida entre ambos. En realidad, como consecuencia de la despolarización espontánea, pasa una corriente muy pequeña que es justamente suficiente para mantener constante la f. e. m. de polarización; por consiguiente, ha habido una electrólisis muy pequeña, que ha recibido el nombre de *electrólisis invisible*, puesto que no es observable.

Acumuladores. — El fenómeno de polarización de los electrodos permite almacenar electricidad en un voltámetro, de donde procede el nombre de *acumulador* dado a un voltámetro polarizado. Los acumuladores que se emplean corrientemente están constituidos en principio por electrodos de plomo sumergidos en ácido sulfúrico diluido. Al pasar la corriente, el ánodo, por la formación de óxidos de plomo mal conocidos, toma un color parduzco, y el cátodo conserva su color gris.

La polarización se debe en este caso a una modificación química de los electrodos, que absorbe una gran cantidad de energía. Esta energía vuelve a encontrarse, en forma de electricidad, en la corriente de despolarización. Se llama *capacidad del acumulador* la cantidad de electricidad que es capaz de restituir; *corriente de carga*, la corriente que produce la polarización, y *corriente de descarga*, la corriente de despolarización. Planté, inventor de los acumuladores, comprobó que la capacidad aumentaba a medida que se repetía la carga y la descarga, y que el ánodo se hacía al mismo tiempo cada vez más poroso. La capacidad aumenta todavía más si se hace también poroso el cátodo cambiándolo con el ánodo. Este aumento de la capacidad se denomina *formación* de los acumuladores.

El procedimiento utilizado por Planté es largo y costoso, por lo cual se utiliza también en la actualidad la formación artificial, empleando como electrodos rejillas de plomo cuyos alveolos se han rellenado con minio, Pb_3O_4, para el ánodo, y con óxido de plomo, PbO, para el cátodo. El ácido sulfúrico que se emplea es de 22º Baumé. Una carga es suficiente para formar el acumulador.

Durante la carga, la f. c. e. m. de un acumulador alcanza rápidamente 2,1 voltios, pasando después lentamente a 2,2 voltios. Se sabe que el



Corte de un acumulador

acumulador es cargado por el desprendimiento tumultuoso de los productos de la electrólisis —hidrógeno y oxígeno—, que ya no son fijados por los electrodos.

Durante la descarga, la f. e. m. desciende rápidamente a 2 voltios, manteniéndose durante mucho tiempo en este valor, y después disminuye hasta 1,8 voltios; en este momento, vuelve a cargarse el acumulador. La gran ventaja de los acumuladores de plomo es la constancia de la f. e. m.

La capacidad de un acumulador se expresa en *amperios-hora*, unidad que no pertenece a ningún sistema. Decir que un acumulador tiene una capacidad de 10 amperios-hora significa que, una vez cargado, puede suministrar 10 amperios durante una hora, o un amperio durante 10 horas. Indicaremos también que un amperio-hora vale 3 600 culombios.

El *rendimiento en cantidad* de un acumulador es la relación entre la cantidad de electricidad que restituye y la que recibe.

El *rendimiento en energía* es la relación entre la energía que proporciona y la que es necesaria para cargarlo. Por ejemplo, un acumulador ha necesitado para su carga el paso de una corriente de i amperios, a e voltios, durante t segundos. Si restituye una corriente de i' amperios a e' voltios durante t' segundos, el rendimiento en cantidad es

$$r = \frac{i't'}{it};$$

y el rendimiento en energía

$$r' = \frac{e'i't'}{eit}.$$

Los acumuladores usuales tienen una capacidad del orden de 11 amperios-hora por kilogramo de plomo utilizado. El rendimiento en cantidad es del orden de 90 por ciento, y el rendimiento en energía de 70 por ciento, porque $e > e'$ (e = 2,5 voltios, por lo menos; e' = 2 voltios).

Un acumulador no debe nunca dejarse descargado, porque si su f. e. m. desciende a menos de 1,8 voltios, se forma sulfato de plomo que lo deteriora irremediablemente; se dice que el acumulador se ha sulfatado, hecho que se comprueba porque los electrodos se ponen blancuzcos.

Acumuladores de níquel. — Están constituidos por un electrodo positivo de acero, con alveolos, entre los que se encuentran copos de níquel. El electrodo negativo está constituido a veces por cadmio mezclado con hierro pulverulento. El electrólito es potasa al 30 por ciento con litinio. La tensión en los bornes es menos constante que la de los acumuladores de plomo, y más baja. El rendimiento en cantidad es del 80 por ciento y el rendimiento en energía del 56,5 por ciento. La ventaja que presentan estos acumuladores sobre los acumuladores de plomo es su menor peso, suministrando 25 watios-hora por kilogramo contra 10 watios-hora que suministran estos últimos. No presentan peligro de deteriorarse cuando no están cargados, aunque si el electrólito no está al abrigo del aire puede haber carbonatación de la potasa, lo que obliga a cambiarlo.

Acumuladores de plata. — Los electrodos son pulverulentos y están contenidos en bolsas de celofán. Uno de ellos está constituido por peróxido de plata y el otro por cinc. El electrólito es una solución de cincato de potasio $Zn(OK)_2$. El rendimiento en cantidad llega al 98 por ciento y el rendimiento en energía al 85 por ciento. Estos acumuladores son muy ligeros y pueden llegar a suministrar 120 watios-hora por kilogramo.

Pilas eléctricas

Pila de Volta. — Se llama *pila eléctrica* el generador de corriente que transforma energía química o calorífica en energía eléctrica. La primera pila fue construida por Volta en 1795 y estaba compuesta (*figura* 436) por un apilamiento de arandelas de cinc, cobre y fieltro impregnado de ácido sulfúrico, regularmente alternadas; de ahí su nombre. La pila de Volta puede formarse más sencillamente sumergiendo una lámina de cinc puro y otra de cobre en ácido sulfúrico (*fig.* 437). Se comprueba entonces que existe entre el cinc y el cobre una diferencia de potencial, estando el cinc al potencial más bajo, de forma que si unimos esta lámina por un alambre conductor, éste es atravesado

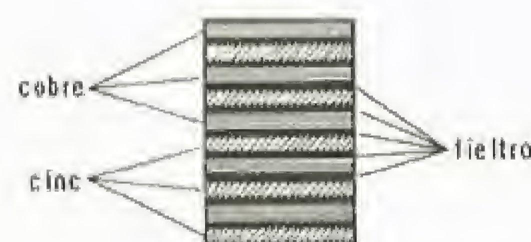


Fig. 436

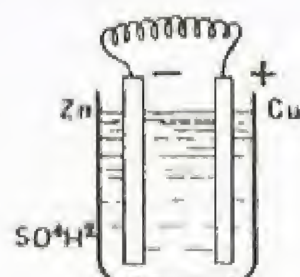


Fig. 437

por una corriente eléctrica. La corriente va del cobre al cinc; el cobre es el *polo positivo* de la pila y el cinc el *polo negativo*.

La corriente pasa también en la pila desde el cinc al cobre, produciéndose electrólisis; el hidrógeno se dirige hacia el cobre (cátodo), en donde se desprende; los iones SO_4 se dirigen hacia el cinc y producen con él sulfato de cinc; el polo negativo se disuelve poco a poco. Debe observarse que el cinc puro no es atacado por el ácido sulfúrico, de forma que cuando la corriente no circula, el polo negativo de la pila permanece inalterado, pero desde que empieza a establecerse la corriente es atacado. Esto explica que el cinc impuro sea atacado por el ácido sulfúrico, ya que contiene metales extraños que forman con él pilas. Como estos metales —principalmente el plomo— están en contacto con el cinc, se cierra el circuito, se establece una corriente y el cinc se disuelve en el ácido sulfúrico.

Las reacciones químicas que se producen en la pila pueden expresarse por la ecuación global:



$$SO_4H_2 + Zn \rightarrow SO_4Zn + H_2.$$

Esta reacción libera energía y es la que proporciona en su mayor parte la energía de la corriente.

La electrólisis que se produce en la pila tiene como efecto polarizar los electrodos y crear una f. c. e. m. de polarización que tiende a anular la f. e. m. de la pila. Esta polarización, debida a la absorción de un poco de hidrógeno por el cobre, es extremadamente perjudicial, ya que al cabo de algún tiempo la corriente de la pila se hace muy débil. Para remediarlo se ha ideado rodear el polo positivo de la pila con una mezcla oxidante que, por su acción sobre el hidrógeno, impediría la polarización. Estas pilas se llaman pilas con *despolarizante*, y se han construido de todas clases. Estudiaremos solamente una, entre las que todavía se emplean: la llamada pila de Leclanché.

Pila Leclanché. — El polo negativo de la pila Leclanché es una barra de cinc, y el polo positivo un cilindro de carbón rodeado de bióxido de manganeso (MnO_2) que actúa como despolarizante (*fig.* 438). El electrólito es cloruro de amonio $ClNH_4$, disuelto en el agua. Al pasar la corriente, los iones Cl van hacia el cinc, produciendo cloruro de cinc, y los iones NH_4 se dirigen hacia el carbono, donde se descomponen en amoniaco NH_3 e hidrógeno. El despolarizante no actúa muy rápidamente, de forma que si la pila funciona mucho tiempo se polariza, pero si sólo se utiliza intermitentemente, por ejemplo para accionar un timbre, hay tiempo para que el despolarizante actúe entre dos utilizaciones.

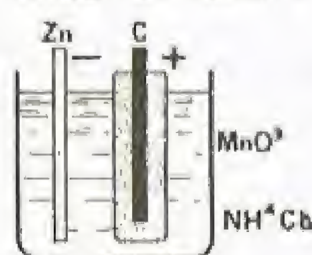


Fig. 438

Entre las modificaciones de la pila Leclanché que todavía se utilizan actualmente pueden citarse:

La *pila Féry*, en la cual el carbón es poroso y donde el aire atmosférico actúa como despolarizante.

Las *pilas secas* para linternas, en las cuales el electrólito está inmovilizado en gelatina.

Pilas impolarizables. — Ya hemos visto que un electrodo de un metal determinado, sumergido en una solución de una de sus sales, es impolarizable. Tomando, pues, dos electrodos de metales diferentes, sumergido cada uno en una solución salina de estos metales, se obtienen *pilas impolarizables*. La principal de estas pilas es la *pila Daniel* (*fig.* 439), en la cual el polo negativo, constituido por cinc, está sumergido en una solución de sulfato de cinc, y el polo positivo, de cobre, en una solución de sulfato de cobre. Un tabique poroso que permite el paso de la corriente empleada evita que se mezclen las soluciones. Al funcionar la pila se electrolizan ambas soluciones, los iones SO_4 se dirigen hacia el cinc, producen sulfato de cinc, y el ion cobre se deposita en el polo positivo. En cuanto al ion cinc, forma sulfato de cinc al encontrar los iones SO_4. Ninguno de los electrodos se modifica por la formación de gases, y los únicos fenómenos que se producen son una disolución del cinc, que hace que se enriquezca la solución en sulfato de cinc, y un depósito de cobre que empobrece la solución en sulfato de cobre. Estos fenómenos no son lo bastante marcados para modificar la f. e. m. de la pila, que permanece suficientemente constante e igual a 1,1 voltio.

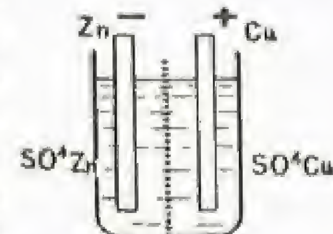


Fig. 439

La f. e. m. se eleva a 1,36 voltios utilizando el circuito cinc, potasa y óxido mercúrico (pila Aron). Reemplazando la potasa por el cincato de potasio, se obtiene una pila (pila Ruben) que se conserva bien, y que fue muy utilizada durante la segunda guerra mundial. También se han utilizado mucho, siempre con fines militares, las pilas de magnesio, que se obtienen substituyendo por este metal el cinc de las pilas anteriores. Como el magnesio es atacado por el electrólito, estas pilas no se conservan. Tampoco se vierte el electrólito hasta el momento del empleo. Estas pilas son muy ligeras, pero sólo pueden servir una vez.

Indiquemos también que se está tratando actualmente de obtener pilas que utilizan metales alcalinos (sodio o potasio) para aprovechar la gran energía química de los compuestos de estos metales con los halógenos (cloro, bromo, yodo).

Otra pila impolarizable es la *pila Weston*, constituida en principio por un polo positivo de mercurio, en contacto con una solución saturada de sulfato mercurioso y por un polo negativo de cadmio en contacto con una solución de sulfato de cadmio. La f. e. m. de esta pila es de tal constancia que el Congreso Internacional de Electricistas de 1908 la escogió como *pila patrón*. El valor de su f. e. m., a 20° C, es 1,0183 voltios, de forma que, de la misma forma que se ha definido el *amperio internacional*, se ha definido el *voltio internacional*, que *es la* $\frac{1}{1,0183}$ *parte de la f. e. m., a 20° C, de una pila Weston*. Tal es la única utilización de esta pila.

Asociación de generadores. — Indiquemos primeramente que en los esquemas suele representarse una pila o un acumulador por dos trazos paralelos, uno de ellos grueso y corto, para representar el polo positivo, y otro largo y delgado, para representar el polo negativo. Nos ajustaremos, en lo sucesivo, a esta convención.

Cuando se desea obtener una f. e. m. superior a la que puede suministrar un solo generador, se asocian varios de ellos *en serie* (*fig.* 440), es decir, se une directamente el polo negativo N_1 del primer generador con el polo positivo del segundo; el polo negativo de este segundo con el positivo del tercero, y así sucesivamente. Los dos polos extremos que quedan libres se unen con los bornes del circuito de utilización. Si P_1N_1, P_2N_2, P_3N_3 son los polos de tres generadores en serie, r_1, r_2, r_3 sus resistencias, e_1, e_2, e_3 sus f. e. m. e I la intensidad de la corriente, se tendrá



Fig. 440

$$V_{N3} - V_{P3} + V_{N2} - V_{P2} + V_{N1} - V_{P1} = V_{N3} - V_{P1},$$

no teniendo en cuenta las diferencias de potencial a lo largo de los conductores que unen dos polos, porque son siempre mínimas. Por otra parte, la ley de Ohm da

$$V_{N3} - V_{P3} = r_3 I - e_3,$$
$$V_{N2} - V_{P2} = r_2 I - e_2,$$
$$V_{N1} - V_{P1} = r_1 I - e_1.$$

De donde

$$V_{N3} - V_{P1} = (r_1 + r_2 + r_3) I - (e_1 + e_2 + e_3).$$

La asociación de generadores en serie se conduce como un generador único *cuya resistencia es la suma de las resistencias de cada uno de los generadores y cuya f. e. m. es la suma de las f. e. m. respectivas.*

Asociando en serie un número suficiente de generadores, puede, pues, obtenerse la f. e. m. que se desee.

Un generador atravesado por una corriente muy intensa suele deteriorarse, por lo que, cuando se quieren obtener tales corrientes, se asocian varios generadores *en derivación (o en paralelo)*, es decir, se reúnen todos los polos positivos a un mismo punto P y todos los polos negativos a otro punto N (*fig.* 441), uniendo los bornes del circuito de utilización a estos dos puntos P y N. En general, sólo se asocian de esta manera generadores idénticos. Si e es su f. e. m. común, r su resistencia común e I la intensidad en el circuito de utilización, cada una de las derivaciones colocadas entre P y N es recorrida por la misma corriente; en el caso de tres generadores, la intensidad de una de

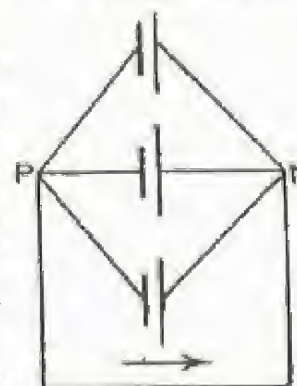


Fig. 441

estas corrientes será, por consiguiente, la tercera parte de la intensidad total I. Asociando un número suficiente de generadores puede disponerse de una intensidad I muy grande, no estando cada generador recorrido más que por una corriente muy pequeña, que era el resultado que se trataba de obtener. Para calcular la f. e. m. de este sistema de generadores, se tendrá:

$$V_N - V_P = r \times \frac{I}{3} - e$$

o también

$$V_N - V_P = I \times \frac{r}{3} - e.$$

Un sistema de generadores idénticos en derivación se conduce como un generador único cuya f. e. m. es igual a la de uno de los generadores y cuya resistencia es el cociente de la resistencia de un generador por el número de generadores.

También existen otras clases de asociaciones, pero no son más que combinaciones de las que acaban de citarse.

Efecto Peltier. Efecto Thomson. — Dados dos metales diferentes M y M′ (*fig.* 442) en contacto mutuo, se establece entre ellos una diferencia de potencial llamada *diferencia de potencial de contacto*, o *f. e. m. de contacto*. Una experiencia sencilla nos lo va a mostrar. Supongamos que el metal M sea el de potencial más elevado, y sea v el valor de la diferencia de potencial de contacto; al pasar de M a M′ una cantidad de electricidad q, sufrirá una caída de potencial v, apareciendo una energía $v \times q$; si la cantidad de electricidad q pasa en sentido contrario, de M′ a M, se perderá una energía $v \times q$. Efectuemos la experiencia haciendo pasar una corriente de M a M′, y después de M′ a M, y comprobaremos que los dos metales en contacto se calientan en el primer caso y se enfrían en el segundo: en el primer caso ha habido producción de energía, y pérdida en el segundo. Este fenómeno, estudiado por Peltier, ha recibido el nombre de efecto Peltier. Naturalmente, se superpone al efecto Joule, pero si los conductores utilizados son gruesos, es decir, poco resistentes, este último efecto es muy débil comparado con el efecto Peltier.

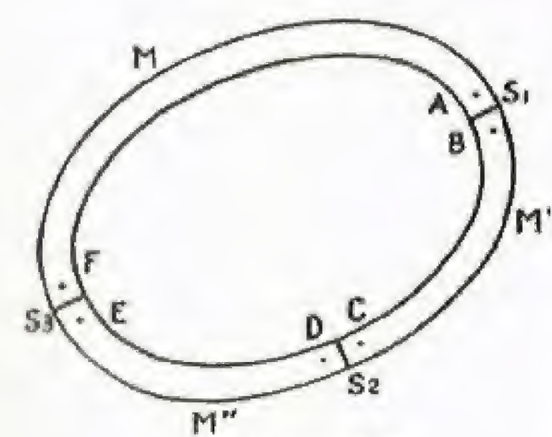


Fig. 442

Los valores de las f. e. m. de contactos son bajos: una barra de bismuto en contacto con otra de cobre tiene un potencial superior al de este último, de 0,021 voltios.

Si en lugar de poner en contacto dos metales diferentes se ponen dos trozos de un mismo metal a temperaturas diferentes, se comprueba análogamente una diferencia de potencial de contacto: es el efecto Thomson.

El conocimiento de estos dos efectos nos permitirá comprender el funcionamiento de las pilas termoeléctricas.

M, A, S1, B, M′, F, S3, E, D, C, S2, M″

Fig. 443

Pilas termoeléctricas. — Sea un circuito cerrado, formado por tres conductores de metales diferentes MM′M″ (*fig.* 443), pero todos a la misma temperatura. Si $S_1S_2S_3$ son las superficies de contacto, AB, CD, EF pares de puntos tomados a ambas partes de $S_1S_2S_3$ y $V_{MM'}$, $V_{M'M''}$, $V_{MM''}$ las diferencias de potencial de contacto, se tendrá

$$V_A - V_B = V_{MM'};\ V_B - V_C = 0;\ V_C - V_D = V_{M'M''};$$
$$V_D - V_E = 0;\ V_E - V_F = V_{M''M};\ V_F - V_A = 0,$$

y sumando miembro a miembro

$$V_A - V_A = 0 = V_{MM'} + V_{M'M''} + V_{M''M}.$$

Si se corta el circuito en S_1, no se produce cambio alguno, subsistiendo la igualdad anterior, y se tendrá

$$V_A - V_B = V_{MM'} = - V_{M''M} - V_{M'M''} = V_{MM''} + V_{M''M'},$$

lo que se expresa diciendo que:

La f. e. m. de contacto de dos metales es la misma, ya estén dichos metales en contacto directo o unidos por uno o varios conductores metálicos.

Esta ley permite, sin alterar el efecto Peltier, soldar dos metales diferentes por una soldadura cualquiera.

La igualdad $V_{MM'} + V_{M'M''} + V_{M''M} = 0$ *muestra que en un circuito metálico de metales diferentes a la misma temperatura la suma de las f. e. m. de contacto es nula, y que no circula corriente alguna.*

Podrían demostrarse dos resultados análogos para las f. e. m. de temperatura correspondiente al efecto Thomson.

Veamos ahora lo que ocurre cuando en un circuito metálico de metales diferentes no están todos los puntos a la misma temperatura. Tomemos un circuito de este tipo compuesto por dos metales MM′ y supongamos que se ha interrumpido un circuito en EF (*fig.* 444).

Se tiene

$$V_A - V_B = v_1,\ V_B - V_E = v_2,\ V_F - V_C = v_3,$$
$$V_C - V_D = v_4,\ V_D - V_A = v_5.$$

v_1 y v_4 son f. e. m. de contacto; v_2, v_3, v_5, f. e. m. de temperatura. Como los puntos B, E, F, C, D, A no están a la misma temperatura, no se tendrá

$$v_1 = -v_4 \text{ ni } v_2 = v_3 = v_5 = 0.$$

De forma que

$$V_F - V_E = v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + v_5$$

no es nula. Si colocamos entre E y F un circuito completo a la misma temperatura que E y F, será atravesado por una corriente. Tal es el principio de las *pilas termoeléctricas* o *pares termoeléctricos*. En virtud de un resultado ya enunciado, el fenómeno no se altera si soldamos los dos metales en S_1 y S_2 con una soldadura cualquiera, pero mantenida en cada uno de los puntos a una temperatura uniforme. En virtud de la misma ley puede establecerse el circuito exterior tanto entre los puntos A y B como entre los puntos E y F. La f. e. m. de un par termoeléctrico es pequeña, por lo cual se les agrupa en serie (*fig.* 445), siendo las soldaduras alternativamente frías y calientes.

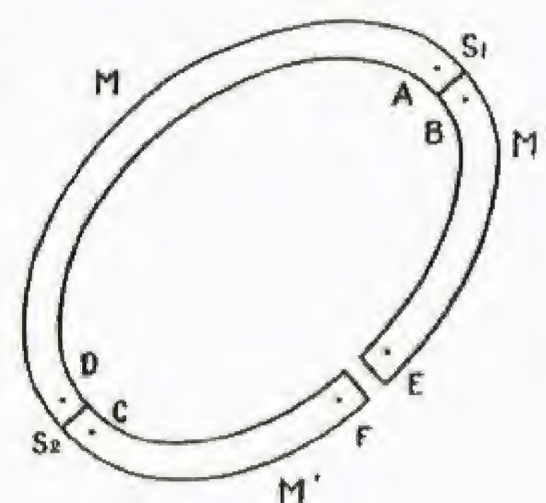


Fig. 444

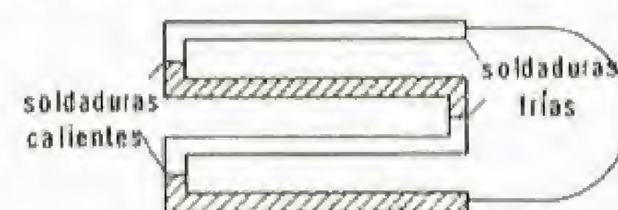


Fig. 445

Muestra la experiencia que, aunque la f. e. m. de algunos pares aumenta constantemente con la diferencia de temperatura entre las dos soldaduras, para la mayoría de los pares presenta un máximo, anulándose y cambiando de sentido. Esta ley de variación está representada por la curva de la figura 446, donde se han indicado en abscisas las temperaturas de la soldadura caliente y en ordenadas la f. e. m. La temperatura θ_0 es la de la soldadura fría, y θ_i es la temperatura a la cual cambia de sentido la f. e. m., denominada *temperatura de inversión*.

La curva muestra claramente que la f. e. m. E, que corresponde a las temperaturas θ_0 y θ, es la suma de las f. e. m. E′ y E″, que corresponden, respectivamente, a las temperaturas θ_0 y θ', y θ' y θ, siendo θ' la temperatura intermedia entre θ_0 y θ. Este resultado se conoce con el nombre de ley de las temperaturas sucesivas.

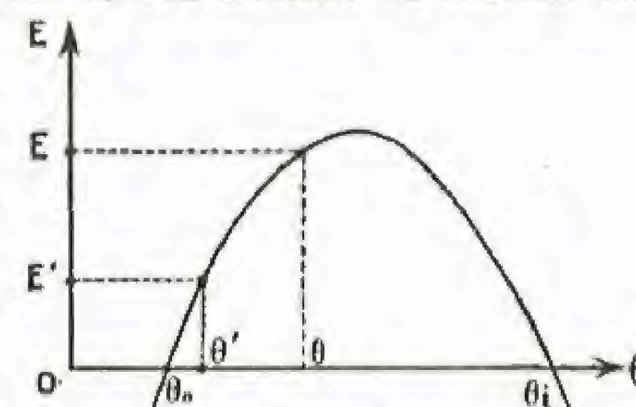


Fig. 446

Las pilas termoeléctricas no se utilizan como generadores de corrientes, sino que se emplean principalmente en la determinación de temperaturas.

Electromagnetismo

Reseña histórica. — **Campos magnéticos creados por las corrientes:** Experiencia de Oersted. Regla de Ampère. Estudio experimental del campo de una corriente. Campo de una corriente rectilínea. Campo magnético de una corriente circular. Campo magnético de un solenoide. Aplicaciones de la ley de Laplace. Unidades electromagnéticas. — **Acción de los campos magnéticos sobre las corrientes:** Demostración experimental. Ley de Laplace. Acción de un campo sobre un circuito cerrado. Trabajo de las fuerzas electromagnéticas. Momento magnético de un circuito. Medición de los campos magnéticos. Acción mutua de dos corrientes. Acción de una corriente sobre sí misma. — **Imantación inducida:** Imantación inducida. Susceptibilidad magnética. Ferromagnetismo. Campo desmagnetizante. Curva de primera imantación. Punto de Curie. Ciclo de histéresis. Calentamiento por histéresis. Permeabilidad magnética. Aleaciones de altas permeabilidades. Teoría del magnetismo. Inducción magnética. Electroimanes. Circuitos magnéticos. — **Inducción:** Estudio experimental. Corrientes de Foucault. F. e. m. de inducción. Ley fundamental. Cantidad de electricidad inducida. Autoinducción. Aplicaciones de los fenómenos de inducción. — **Aparatos de mediciones eléctricas:** *Amperímetros de imán móvil:* Generalidades. Galvanómetro de imán móvil. Amperímetro de imán móvil. Voltímetros. *Aparatos de cuadro móvil:* Galvanómetros de cuadro móvil. Amperímetros y voltímetros de cuadro móvil. Galvanómetros balísticos. Flúxmetro. — **Dinamos de corriente continua:** *Dinamos generatrices:* Generalidades. Órganos de una dinamo. Funcionamiento de la dinamo. Fuerza electromotriz de una dinamo. Rendimiento de una dinamo. Reacción del inducido. Excitación. Dinamos multipolares. *Dinamos motrices:* Motores de corriente continua. Fuerza contraelectromotriz y potencia de un motor eléctrico. Motor serie. Motor-shunt. Motor compuesto. Rendimiento de los motores. Distribución de la corriente continua

Reseña histórica. — **Oersted** (1777-1851) descubrió en 1820 que una corriente eléctrica desvía una aguja imantada. **Ampère** (1775-1836) reanudó las experiencias de Oersted. **Biot** (1774-1862) y **Savart** (1791-1841) estudiaron la acción de una corriente rectilínea sobre un imán. **Laplace** dedujo de dicha acción la ley que da, en un campo magnético, la fuerza aplicada a un elemento de corriente muy pequeño. Arago, en 1820, consiguió imantar una aguja de acero mediante una corriente eléctrica.

Ampère estudió después las acciones mutuas de las corrientes asimilando una espira de corriente a un imán (solenoide), estableciendo entonces la teoría de la **electrodinámica. Rowland** (1848-1901) demostró en 1876 que la aguja imantada se desvía en la proximidad de un disco cargado eléctricamente y mantenido en rotación rápida alrededor de su eje.

Los primeros electroimanes fueron construidos por **Sturgeon** (1825), **Brewster** (1781-1868) [1826] y **Henry** (1831), **Gauss** hizo los primeros ensayos de telegrafía eléctrica (V. Telegrafía, pág. 215).

La experiencia de Oersted proporcionó el medio de medir la corriente, y Ampère estudió la posibilidad de construcción del galvanómetro. **Nobili** (1784-1835) construyó en 1826 un multiplicador de aguja astática. **Pouillet,** en 1837, inventó la brújula de tangentes. **Thomson,** en 1851, inventó un galvanómetro muy sensible. El galvanómetro de cuadro móvil de **Deprez** (1843-1918) y **d'Arsonval** (1851-1940) data de 1882.

Inducción. **Aragó** descubrió en 1824 el magnetismo de rotación, pero no llegó a conclusión alguna. Faraday reanudó su estudio, en 1831, y estableció la inducción; en 1834, **Lenz** estableció la ley sobre el sentido de la corriente inducida; **Foucault** (1819-1868) demostró la existencia de las corrientes que llevan su nombre (1855).

Neumann (1795-1895), al establecer una teoría matemática para la inducción, consideró en 1845 la noción de potencial.

Después de Neumann, **Weber** (1804-1891) en 1846, **Kirchhoff** (1849), **Helmholtz** (1821-1894) en 1851 y **Thomson** (1855) comprobaron experimentalmente la teoría matemática de la inducción. Finalmente, **Clerk Maxwell** (1873) formuló las ecuaciones generales que permiten determinar el estado de un campo eléctrico.

Autoindicación. **Henry** publicó en 1832 una memoria sobre la autoinducción, y **Faraday** precisó, en 1835, las condiciones de este fenómeno.

Máquinas magnetoeléctricas. El primer motor eléctrico fue la rueda de **Barlow** (1786-1862) [1822] que fue inventada basándose en los trabajos de Ampère. El descubrimiento de Faraday se aplicó a la producción de corrientes eléctricas. En 1832, **Ampère** hizo que **Pixii** construyera una máquina de inducción. **Clarke** (1815-1895) y **Page** construyeron otra máquina, pero de rendimiento demasiado pequeño. Después de algunos perfeccionamientos sugeridos por **Siemens, Paccinotti** propuso un dispositivo constituido por un arrollamiento en anillo de la bobina inducida. Por último, **Gramme** (1826-1901) fabricó en 1869 la primera máquina con inducido en forma de anillo.

La primera **transmisión de energía** por la corriente eléctrica data de 1883 **(Deprez).** El primer **transformador** fue construido en 1840 por **Masson** y **Breguet** (1804-1883) y puesto a punto por **Ruhmkorff** (1803-1877) en 1851. Los transformadores modernos fueron inventados en 1880 por **Gaulard** (1850-1888) y **Gibbs** (1839-1903). Las corrientes polifásicas y los motores asincrónicos datan de 1885 [**Ferraris** (1847-1897) y **Tesla** (1857-1943)].

Campos magnéticos creados por las corrientes

Experiencia de Oersted. Regla de Ampère. — Una corriente eléctrica crea a su alrededor un campo magnético. Esta propiedad, de importancia capital, fue descubierta por Oersted en 1819 de la forma siguiente: una aguja imantada NS (*fig.* 447), situada en la proximidad de un conductor rectilíneo, se desvía de su posición de equilibrio norte-sur cuando dicho conductor es atravesado por una corriente. La corriente crea, por consiguiente, un campo magnético que actúa sobre la aguja. Oersted comprobó que la desviación de la aguja cambiaba de sentido cuando se invertía la corriente, y Ampère precisó la relación entre la dirección del campo y el sentido de la corriente en la regla conocida por regla de Ampère:

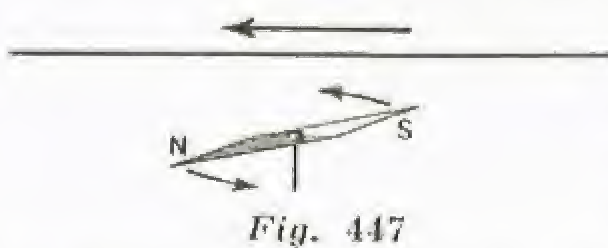


Fig. 447

Un observador tendido, mirando la aguja, a lo largo de la corriente, de modo que ésta le entre por los pies y le salga por la cabeza, verá desviarse el polo norte de ella hacia su izquierda.

Estudio experimental del campo de una corriente. — El campo magnético de una corriente se estudia de la misma forma que el creado por un imán; se determina su dirección y su magnitud por los métodos antes expuestos (v. pág. 117 y 118); se puede incluso obtener su espectro. Así vamos a estudiar los campos creados por algunos circuitos particulares.

Campo de una corriente rectilínea. — La experiencia muestra que una corriente rectilínea crea en un punto M un campo perpendicular al plano definido por este punto y la corriente, y dirigido en el sentido indicado por la regla de Ampère (*figura* 448). De donde resulta que las líneas de fuerza son circunferencias centradas alrededor de la corriente y cuyos planos son perpendiculares a la misma. Verificaremos inmediatamente este resultado formando el espectro magnético del campo, para lo cual tomaremos una corriente rectilínea y haremos que atraviese un cartón horizontal bien rígido (*fig.* 449). Espolvoreando el cartón con limaduras de hierro, éstas dibujarán circunferencias centradas alrededor de la corriente. El sentido de las líneas de fuerza es dado por la regla de Ampère, pero también se utiliza otra regla debida a Maxwell:

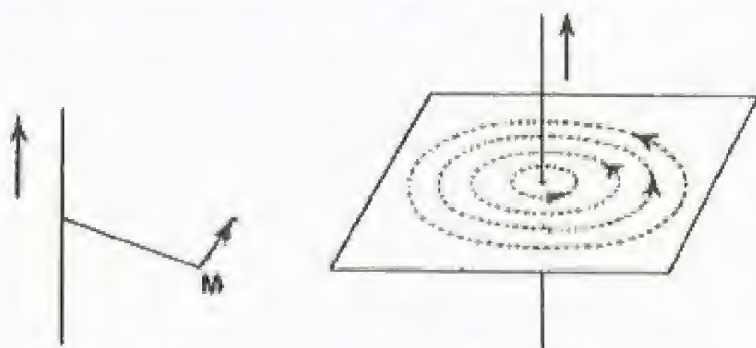
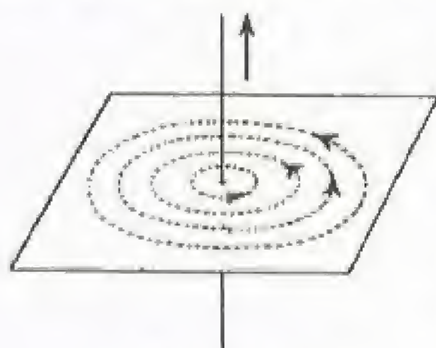
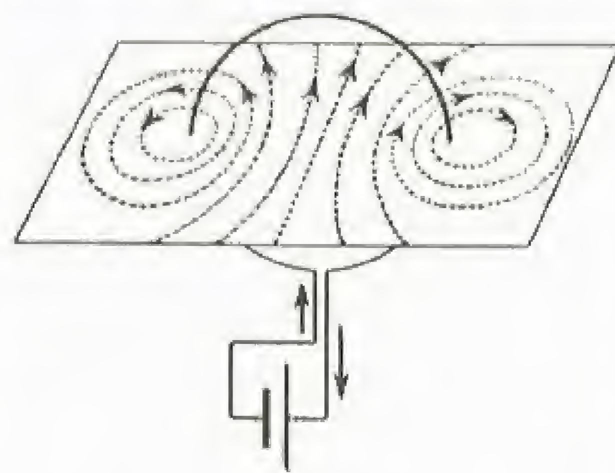


Fig. 448


Fig. 449

El sentido de las líneas de fuerza es el que se imprime a un sacacorchos para que avance en el mismo sentido de la corriente.

Campo magnético de una corriente circular. — El espectro del campo creado por una corriente circular (*fig.* 450) se compone de líneas cerradas que rodean la corriente y de una línea recta, que es el eje del círculo que la recorre. Aplicando la regla de Ampère se comprueba fácilmente que *todas* las líneas de fuerza salen por la *misma* cara de la corriente (la cara de detrás de la figura); por analogía con los imanes, llamaremos *cara norte* esta cara y *cara sur* la otra. Las líneas de fuerza van, como en un imán, de la cara norte a la cara sur. Se vuelven a encontrar fácilmente las caras de una corriente notando *que un observador colocado ante la cara sur ve girar la corriente en el sentido de las agujas de un reloj.*


Fig. 450

Campo magnético de un solenoide. — Un *solenoide* está constituido por un hilo conductor arrollado en hélice. Las líneas de fuerza del campo creado por una corriente que pasa por un solenoide presentan el aspecto de la figura 451 y recuerdan completamente las del campo creado por una barra imantada. La importancia del solenoide es debida a que, en su interior, las líneas de fuerza son paralelas, siendo el *campo uniforme.*

Para estudiar más estrechamente la analogía de un solenoide con un imán aproximemos a la cara marcada N en la figura 452 el polo norte de un imán: es rechazado, siendo en cambio atraído por la cara marcada S. La analogía, aunque parece completa, no lo es, porque en el interior del solenoide existe un campo fácilmente medible, mientras que no es posible definir el campo del interior de un imán.

Obsérvese que los polos (o caras) norte y sur del solenoide pueden hallarse por la regla antes indicada para una corriente circular.

Ley de Laplace. Los resultados de mediciones hechas sobre los campos magnéticos creados por las corrientes han permitido a Laplace enunciar la siguiente ley:

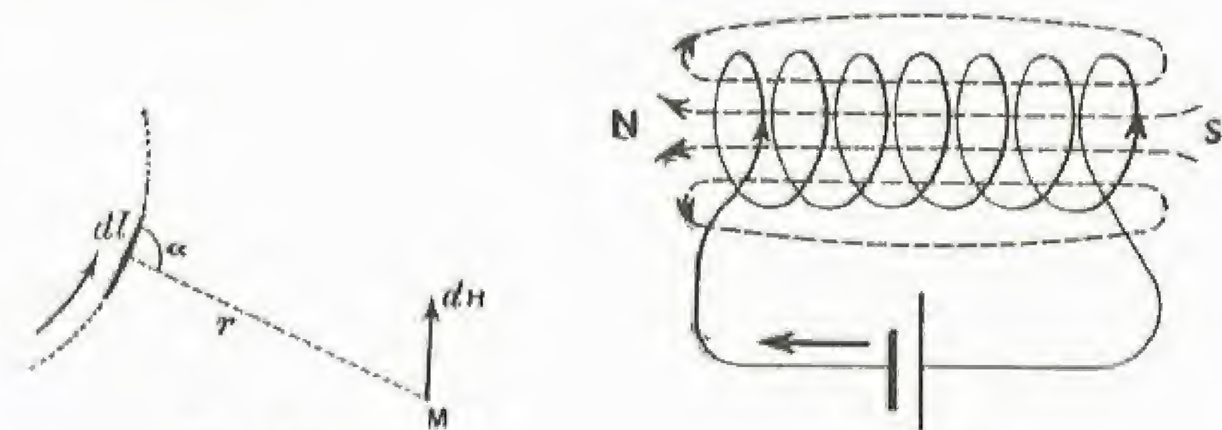


Fig. 451 *Fig.* 452

a) *El campo producido por una corriente en un punto puede calcularse efectuando la suma geométrica de los campos creados en dicho punto por todos los elementos en los cuales puede descomponerse la corriente.*

b) *El campo producido en un punto* M *por un elemento de corriente rectilínea de longitud* dl *es perpendicular al plano definido por el punto* M *y el elemento de corriente, y está dirigido como indica la regla de Ampère. Su intensidad* dH *es proporcional a la intensidad* i *de la corriente, a la longitud* dl *del elemento de corriente y al seno del ángulo* α *que forma el elemento de corriente con la recta que lo une con el punto* M, *e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia del punto* M *al elemento de corriente.*

Esta ley queda resumida por la figura 451 y por la fórmula

$$dH = K \frac{idl \operatorname{sen} \alpha}{r^2},$$

donde el coeficiente K sólo depende de las unidades escogidas.

Como siempre puede descomponerse una corriente en elementos suficientemente pequeños para considerarlos como rectilíneos, la ley de Laplace permite calcular el campo creado por una corriente de cualquier forma.

A veces es cómodo hacer en la fórmula precedente el coeficiente K = 1, escogiendo convenientemente la unidad de intensidad de corriente y tomando para las otras magnitudes las unidades C. G. S. Esta unidad de intensidad de corriente es la *unidad electromagnética,* que fue definida históricamente antes que el amperio, el cual se definió después como $\frac{1}{10}$ de la unidad electromagnética (abreviadamente u. e. m.).

Si se toma por unidad de intensidad de corriente el amperio, la fórmula precedente se convierte en

$$dH = \frac{1}{10} \frac{idl \operatorname{sen} \alpha}{r^2}.$$

La *ley de Laplace* es lo que se llama una *equivalencia matemática,* y permite calcular el campo producido por una corriente, pero no expresa un hecho físico.

Aplicaciones de la ley de Laplace. — Apliquemos la ley de Laplace al cálculo del campo producido en su centro por una corriente circular de I amperios de intensidad. Es evidente, por razones de simetría, que el eje de la corriente circular soporta el campo total. Consideremos un elemento pequeño de corriente AB (*fig.* 453); su distancia al punto O es el radio de círculo R, el ángulo α de la ley de Laplace vale 90°, sen α = 1 y, por consiguiente,

$$dH = \frac{1}{10} \times \frac{I \times dl}{R^2},$$

y el eje de la corriente soporta el campo elemental dH; para obtener el campo total H basta efectuar la suma aritmética de todos los campos elementales dH. En la expresión de este último, los factores $\frac{1}{10}$ I y $\frac{1}{R^2}$ permanecen constantes, por lo que el campo H será el producto de la suma de todos los elementos de longitud dl por $\frac{1}{10}\ \frac{I}{R^2}$; esta suma es la longitud $2\pi R$ del círculo. Por consiguiente,

Fig. 453

$$H = \frac{1}{10} \times \frac{I \times 2\pi R}{R^2} = \frac{2\pi I}{10R}.$$

Si se arrolla la corriente N veces sobre sí misma de forma que se obtengan N círculos prácticamente confundidos, el campo en el centro será

$$H = N \times \frac{2\pi I}{10R}.$$

Análogamente se demostraría que el campo de una corriente rectilínea en un punto M situado a una distancia R de la corriente tiene por valor

$$H = \frac{2I}{10R}$$

y que el campo en un punto del eje de un solenoide muy largo es

$$H = \frac{4\pi n I}{10},$$

siendo n el número de espiras por centímetro de longitud.

Unidades electromagnéticas. — Una vez definida la u. e. m. de intensidad de corriente, pueden definirse todas las demás unidades.

La u. e. m. de cantidad de electricidad es la cantidad de electricidad transportada por segundo por una corriente cuya intensidad es igual a la u. e. m.

La u. e. m. de diferencia de potencial es la diferencia de potencial que existe entre dos puntos tales que una carga eléctrica que se desplace de un punto al otro efectúe un trabajo de 1 ergio.

El amperio se ha definido como el $\frac{1}{10}$ de la u. e. m. y de esto se deduce fácilmente que el voltio vale 10^8 u. e. m., etc.

La relación entre las unidades electromagnéticas y las unidades electrostáticas sólo puede hallarse experimentalmente, ya que estos dos sistemas de unidades se han definido independientemente. Se ha encontrado que la u. e. m. de cantidad de electricidad vale 3.10^{10} unidades electrostáticas. Es interesante observar que el número 3.10^{10} expresa la velocidad de la luz en centímetros por segundo.

Se deduciría fácilmente de estos datos las relaciones entre las unidades prácticas y las unidades electrostáticas, relaciones que ya hemos indicado a su debido momento.

TEOREMA DE AMPERE. Consideremos el campo producido por una corriente rectilínea de I amperios de intensidad; el campo en un punto M es (véase anteriormente)

$$H = \frac{2I}{10R}.$$

Supongamos una masa magnética igual a la unidad colocada en M (*fig.* 454); estará sometido a una fuerza H, y cuando esta masa describa un círculo de radio R centrado alrededor de la corriente, el trabajo T de esta fuerza será $2\pi RH$, puesto que el campo es constantemente tangente al círculo. Se tendrá, pues,

$$T = 2\pi R \times \frac{2I}{10R} = \frac{4\pi I}{10}.$$

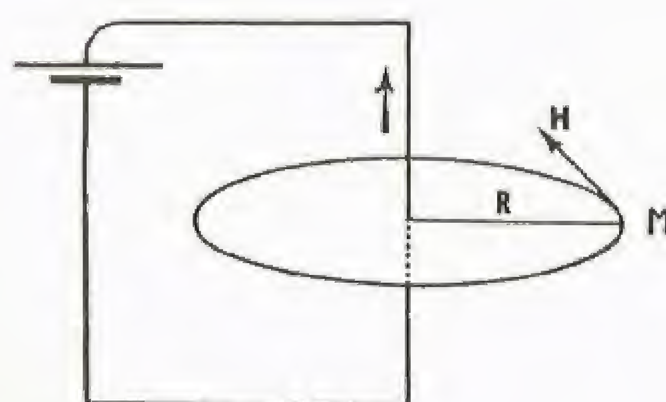


Fig. 454

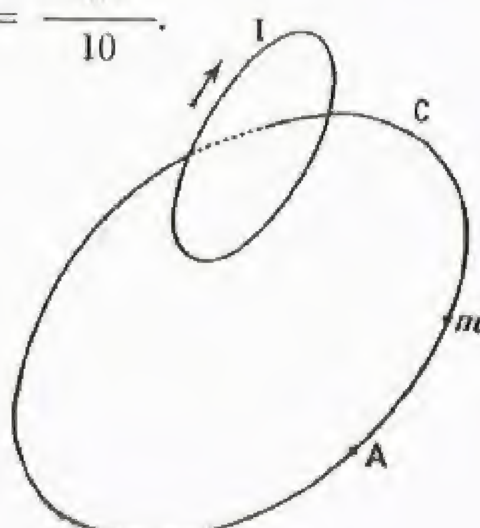


Fig. 455

Observemos primeramente que este trabajo es independiente de la distancia R; se demuestra además que conserva el mismo valor $\frac{4\pi I}{10}$ cuando la corriente ya no es rectilínea y que la masa magnética describe una curva cerrada C cualquiera, siempre que dicha curva pase una vez por el interior del circuito (*fig.* 455). Evidentemente, el trabajo T será positivo o negativo según el sentido en que se describa el recorrido C. Si la curva C pasa varias veces por el interior del circuito, el trabajo es igual a tantas veces $\frac{4\pi I}{10}$ como la curva C atraviesa el circuito.

El conjunto de estos resultados se conoce con el nombre de *teorema de Ampère*, y muestra que el campo magnético creado por una corriente no deriva de un potencial en el sentido habitual de la palabra. En efecto, si derivara, como se parte de un punto A de la curva C para volver al mismo punto A, la diferencia de potencial sería nula, y por lo tanto también el trabajo.



Fig. 456

Debe observarse, no obstante, que el trabajo es efectivamente nulo si la curva C no atraviesa el circuito (*fig.* 456). Puede, pues, decirse, ampliando la noción de potencial, que el potencial de un punto A puede tener varios valores:

$$V_A,\ V_A + \frac{4\pi I}{10},\ V_A + 2 \times \frac{4\pi I}{10},\ \text{etc.}$$

Acción de los campos magnéticos sobre las corrientes

Demostración experimental. — Una masa magnética situada en la proximidad de una corriente está sometida a una fuerza; el principio de la ación y la reacción exige que la corriente esté a su vez sometida por parte de la masa magnética a otra fuerza igual y de signo contrario. Dicho de otra forma, los campos magnéticos deben actuar sobre las corrientes, como va a mostrarnos la experiencia siguiente.

Sea un conductor vertical móvil alrededor de un punto O y cuya parte inferior está sumergida en un recipiente de mercurio G (*fig.* 457). Coloquemos un imán de herradura de forma que el conductor quede situado entre sus brazos; el conductor quedará entonces situado en un campo magnético. Si hacemos que pase una corriente por el conductor, éste se desplazará y se pondrá oblicuo. El sentido de desplazamiento del conductor depende de los sentidos respectivos de la corriente y del campo magnético, y queda precisado por la regla de Ampère: *un elemento rectilíneo de corriente situado en un campo magnético está sometido a una fuerza perpendicular al plano definido por el campo y el elemento de corriente y dirigida hacia la izquierda de un observador colocado en la dirección de la corriente, de forma que ésta le entre por los pies y le salga por la cabeza, mirando en la dirección del campo* (*fig.* 458).

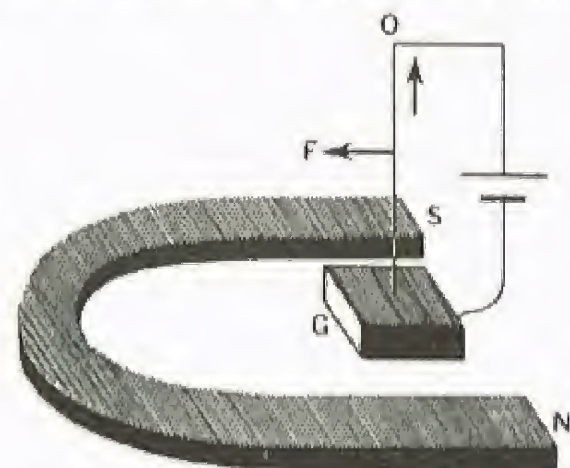


Fig. 457

Por la acción de un imán sobre una corriente puede crearse un movimiento continuo. Para ello, en un disco de cobre C hace llegar la corriente a la circunferencia por medio de un conducto lleno de mercurio, y salir por el centro. Puede admitirse que la corriente va de la

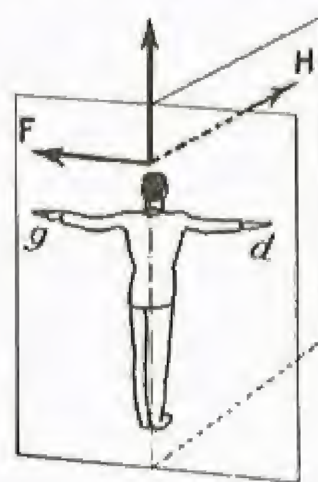


Fig. 458

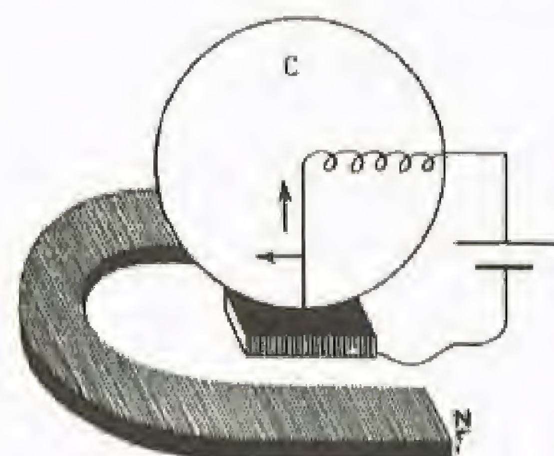


Fig. 459

circunferencia al centro del disco siguiendo un radio. Colocando esta corriente en un campo magnético por medio de un imán, por ejemplo, queda sometida a una fuerza. En la figura 459, la corriente es arrastrada hacia la izquierda, y como un radio sucede a otro radio, el disco gira en el sentido de las agujas de un reloj: se ha realizado un motor eléctrico. Este dispositivo lleva el nombre de *rueda de Barlow:* constituye sólo una experiencia de laboratorio.

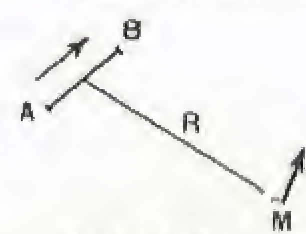


Fig. 460

Ley de Laplace. — Un elemento de corriente AB (*fig.* 460), de longitud dl, recorrido por una corriente de I amperios, crea en un punto M situado a una distancia R un campo H dado por la fórmula

$$H = \frac{I dl \text{ sen } \alpha}{10R^2}.$$

Una masa magnética m colocada en M está sometida a una fuerza $F = mH \dfrac{mIdl \text{ sen } \alpha}{10R^2}$. El principio de la acción y de la reacción nos dice que la masa m ejerce sobre el elemento AB una fuerza $F' = F$:

$$F' = \frac{m}{R^2} \times \frac{Idl \text{ sen } \alpha}{10}.$$

Ahora bien, $\dfrac{m}{R^2}$ es el campo H creado en AB por la masa m, y por consiguiente se tendrá

$$F' = \frac{1}{10} HIdl \text{ sen } \alpha.$$

Esta fórmula expresa la ley de Laplace relativa a la acción de los campos sobre las corrientes:

Un elemento de corriente situado en un campo magnético está sometido a una fuerza proporcional a dicho campo, a la intensidad de la corriente, a la longitud del elemento de la corriente y al seno del ángulo que forman el campo y la corriente.

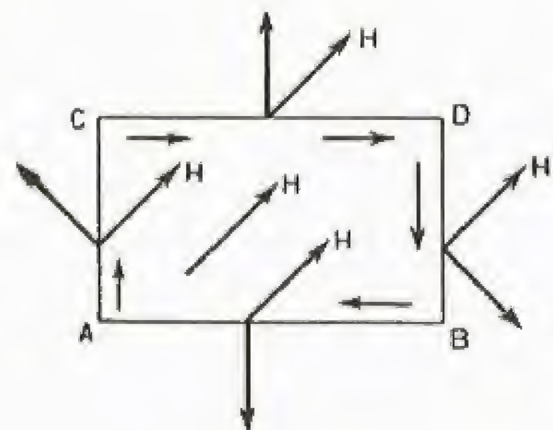


Fig. 461

Acción de un campo sobre un circuito cerrado. — Consideremos un circuito rectangular ABCD vertical, de lados AC $= a$, AB $= b$, situado en un campo uniforme H horizontal que forme un ángulo $\dfrac{\pi}{2} - \alpha$ con el plano del circuito (o el ángulo α con la normal al plano del circuito) (*fig.* 461). Los lados CD y AB están sometidos a fuerzas verticales iguales a $\dfrac{HIb \cos \alpha}{10}$ y opuestas, por lo cual se destruyen. Los lados AC y BD están sometidos a fuerzas iguales a $\dfrac{HIa \text{ sen } \dfrac{\pi}{2}}{10} = \dfrac{HIa}{10}$, pero no opuestas, por lo cual forman un par. Para verlo mejor, supongamos el circuito ABCD visto por encima (*figura* 462); las fuerzas FF' son paralelas, pero no tienen el mismo soporte. El momento C de este par tiene como valor aritmético:

$$C = F \times BE$$

o, puesto que $F = \dfrac{HIa}{10}$

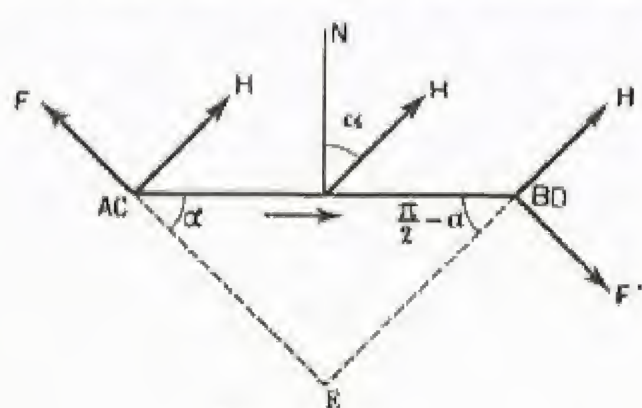


Fig. 462

y $\quad BE = AB \cos\left(\dfrac{\pi}{2} - \alpha\right) = AB \text{ sen } \alpha,$

$$C = \frac{HIab \text{ sen } \alpha}{10}.$$

Teniendo en cuenta que ab es igual a la superficie S del circuito, se tendrá,

$$C = \frac{HIS \text{ sen } \alpha}{10}.$$

El circuito tiende a girar, al estar sometido a un par, y estará en equilibrio cuando C sea nulo, es decir, cuando también lo sea sen α, lo que ocurrirá para $\alpha = 0$ y para $\alpha = \pi$ (*figs.* 463 y 464); fácilmente se ve que sólo la primera posición corresponde a un equilibrio estable: suponiendo que el cuadro se aparte un poco de su posición de equilibrio, se ve que las fuerzas que se producen tienden, en el primer caso, a que vuelva a su posición, y en el segundo, a que se retire de la misma.

Fig. 463 *Fig.* 464

El flujo φ que atraviesa el cuadro es $\varphi = Hs \cos \alpha$, y por consiguiente se tendrá

$$C = \frac{I}{10} \frac{d\varphi}{d\alpha}.$$

El par es nulo y el cuadro está en equilibrio cuando $\dfrac{d\varphi}{d\alpha} = 0$, es decir, cuando el flujo es máximo o mínimo.

Convengamos en contar positivamente los flujos cuando el campo entre por la cara negativa del circuito, lo que equivale a dirigir la seminormal como se ha hecho en las figuras anteriores; veremos entonces que la primera posición de equilibrio ($\alpha = 0$) corresponde al máximo del flujo ($\varphi = HS$) y que la segunda posición de equilibrio corresponde a un mínimo del flujo ($\varphi = - HS$).

Puede, pues, decirse que el cuadro tiende a colocarse de forma que reciba la mayor cantidad de flujo por su cara negativa, puesto que únicamente es estable la primera posición de equilibrio. Este hecho, establecido para un caso particular (circuito rectangular y campo uniforme), es válido en todos los casos:

Un circuito cerrado situado en un campo magnético tiende a colocarse de forma que su cara negativa admita el máximo de flujo.

La fórmula $C = \dfrac{I}{10} \dfrac{d\varphi}{d\alpha}$, que puede variar de signo, es válida para un circuito cualquiera situado en un campo uniforme:

Un circuito cerrado situado en un campo uniforme está sometido a un par de momento

$$C = \frac{I}{10} \frac{d\varphi}{d\alpha},$$

siendo las unidades empleadas el amperio, el maxwell y la dina-centímetro.

Trabajo de las fuerzas electromagnéticas. — Hemos escrito $C = \dfrac{I}{10} \dfrac{d\varphi}{d\alpha}$ en vez de $C = - \dfrac{I}{10} \dfrac{d\varphi}{d\alpha}$: justifiquemos este cambio de signo. Cuando el cuadro antes considerado gira un ángulo pequeño $d\alpha$, el trabajo de las fuerzas electromagnéticas es

$$dT = Cd\alpha = \frac{I}{10} d\varphi;$$

por consiguiente, si el cuadro pasa de una posición en que el flujo que lo atraviesa es φ_1 a una posición en que el flujo es φ_2, el trabajo de las fuerzas electromagnéticas es

$$T = \frac{1}{10} (\varphi_2 - \varphi_1).$$

Si el flujo φ_2 es el flujo máximo, tenemos $\varphi_2 > \varphi_1$, y el trabajo T es positivo; adoptando la fórmula $C = \dfrac{I}{10} \dfrac{d\varphi}{d\alpha}$ se habría encontrado, en cambio, un valor negativo, lo que sería absurdo, porque las fuerzas electromagnéticas tienden a que el cuadro tome una posición en la que el flujo sea máximo. La fórmula antes establecida para el trabajo de las fuerzas electromagnéticas es general:

Cuando un conductor o parte del mismo se desplaza o se deforma en un campo magnético, el trabajo de las fuerzas electromagnéticas es igual al producto de la variación del flujo por la décima parte de la intensidad, expresada en amperios, de la corriente que recorre el circuito.

Momento magnético de un circuito. — Un solenoide móvil alrededor de un eje vertical (*fig.* 465) y situado en el campo terrestre se orientará en la dirección de este campo, de forma que éste penetre por su cara sur y salga por su cara norte. En otras palabras, el solenoide se orientará, como un imán, en la dirección norte-sur. Si se calcula el par que actúa sobre el solenoide podría determinarse el momento magnético $\vec{M}$ de una barra imantada equivalente al solenoide, y decirse que el solenoide tiene un momento magnético $\vec{M}$. Este resultado podría extenderse fácilmente a un circuito cualquiera. Se verificaría fácilmente, por ejemplo, que el cuadro rectangular ABCD antes considerado equivale a un imán situado según el eje del cuadro, con el polo norte en el lado de la cara norte, y cuyo momento magnético sería: $\vec{M} = \dfrac{IS}{10}$.

Fig. 465

Medición de los campos magnéticos. — La medición de las fuerzas que actúan sobre un circuito permite calcular el valor de un campo magnético. Describiremos el principio de un aparato llamado *balanza de Cotton*, que permite efectuar estas mediciones. Una corriente rectilínea AB, de longitud l, se coloca en la extremidad de la cruz de una balanza por medio de un dispositivo apropiado (*fig.* 466). Cuando esta corriente se coloca en un campo horizontal, queda sometida a una fuerza vertical, y dándole un sentido conveniente, podrá dirigirse la fuerza hacia abajo. Se equilibra esta fuerza y después se mide, colocando pesos en el platillo P de la balanza.

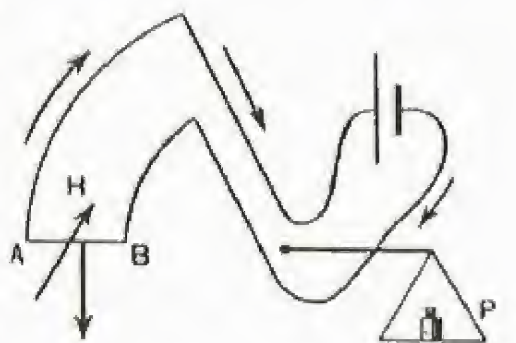


Fig. 466

Acción mutua de dos corrientes. — Una corriente que crea un campo magnético ejerce una acción sobre otra corriente, y recíprocamente; las dos acciones deben ser iguales y de sentidos contrarios.

Hemos visto que la acción de un campo sobre un circuito cerrado se calcula a partir del flujo que atraviesa el circuito; determinaremos, pues, los flujos que cada circuito envía al otro.

Sean dos circuitos C, C' por los cuales circulan las corrientes I, I'; el campo creado por C es proporcional a I y el flujo φ que envía a través de este circuito es

$$\varphi = MI.$$

Análogamente, el flujo φ' que atraviesa C es proporcional a I':

$$\varphi' = MI'.$$

Si las acciones se reducen a dos pares (iguales), sus momentos Γ y Γ' son

$$\Gamma = \frac{I}{10}\frac{d\varphi'}{d\alpha} = \frac{I}{10} \cdot \frac{d(MI')}{d\alpha}.$$

$$\Gamma' = \frac{I'}{10}\frac{d\varphi}{d\alpha} = \frac{I'}{10} \cdot \frac{d(MI)}{d\alpha}.$$

Como I e I' son independientes de α, se tendrá

$$\Gamma = \frac{II'}{10} \cdot \frac{dM'}{d\alpha}, \qquad \Gamma' = \frac{II'}{10}\frac{dM}{d\alpha}.$$

Hemos dicho que $\Gamma = \Gamma'$ necesariamente, y por consiguiente $M = M'$. Este factor recibe el nombre de *coeficiente de inducción mutua de los dos circuitos.*

En unidades electromagnéticas las anteriores igualdades se expresarían

$$\varphi = MI, \quad \varphi' = MI', \quad y \quad \Gamma = \Gamma' = II'\frac{dM}{d\alpha}.$$

Las primeras igualdades nos permiten definir la unidad de coeficiente de inducción mutua (abreviadamente c.i.m.).

La unidad de c.i.m. es el c.i.m. de dos circuitos cuyos contornos son tales que si uno de ellos es recorrido por una corriente igual a una unidad e.m., el otro es atravesado por un flujo de 1 maxwell.

Se vería fácilmente que dos corrientes rectilíneas y del mismo sentido se atraen (*fig.* 467), y que dos corrientes paralelas y de sentidos contrarios se repelen.

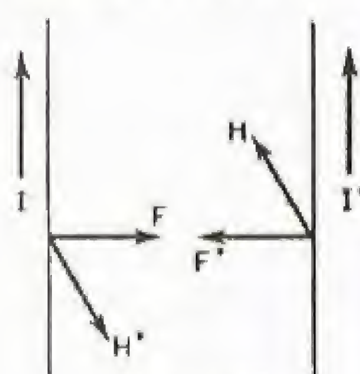


Fig. 467

Acción de una corriente sobre sí misma. — Una corriente está siempre sometida al campo magnético que ella misma crea, y si es deformable, tenderá a que el flujo máximo entre por su cara negativa. Como se ha definido por cara negativa aquella por la que entran las líneas de fuerza, el flujo será máximo cuando la superficie del circuito también lo sea. La experiencia siguiente, debida a Ampère, pone claramente de manifiesto este resultado.

Una corriente eléctrica recorre dos conductos de mercurio paralelos (*fig.* 468), unidos por un puente de cobre que flota sobre el mercurio. Una vez establecida la corriente, el puente se aleja de los puntos de llegada y de salida de la corriente, aumentando así la superficie del circuito, cualquiera que sea el sentido de la corriente.



Fig. 468

Si la superficie del circuito no es variable, pero ciertas partes son móviles con respecto a otras, el circuito se deformará, aunque siempre de manera que el flujo máximo entre por su cara negativa. El cálculo de las acciones de un circuito sobre sí mismo es, en general, complejo.

Imantación inducida

Imantación inducida. Susceptibilidad magnética. — Todos los cuerpos situados en un campo magnético se convierten en imanes. Por ejemplo, un pedazo de hierro colocado entre los brazos de un imán de herradura atrae la limadura de hierro, perdiendo esta propiedad cuando se retira el imán. Este fenómeno ocurre siempre, aunque es muy poco apreciable en la mayoría de los cuerpos. La imantación recibida I es, en general, proporcional al campo H que la provoca o *campo magnetizante*. Se tiene

$$\vec{I} = \varkappa\, \vec{H},$$

lo que expresa que el vector $\vec{I}$ es paralelo al vector $\vec{H}$ y que su intensidad es proporcional a la del campo. La constante $\varkappa$ se denomina *susceptibilidad magnética* de la substancia considerada y puede ser positiva o negativa, es decir, que el vector $\vec{I}$ puede ser del mismo sentido o de sentido contrario al campo $\vec{H}$. Los cuerpos, bastante raros, en los cuales $\varkappa$ es positiva, se llaman *paramagnéticos*. Tales son el oxígeno ($\varkappa = 0{,}16 \cdot 10^{-6}$ a 0° C), el aire y las sales de hierro. La mayoría de las substancias tienen, al contrario, una susceptibilidad negativa y se llaman *diamagnéticas*. El bismuto, en el que la propiedad está más acusada, tiene una susceptibilidad igual a $-12 \cdot 10^{-6}$.

Hay algunos cuerpos, entre ellos el hierro, que no pueden incluirse en estas categorías, ya que su susceptibilidad depende de la magnitud del campo magnetizante, e incluso su imantación puede no ser paralela a este campo. Estos cuerpos constituyen el grupo de las *substancias ferromagnéticas*.

Ferromagnetismo. Campo desmagnetizante. — Las substancias ferromagnéticas son: el hierro, el níquel, el cobalto, el acero, el óxido Fe_3O_4 y ciertas aleaciones de hierro. Estas substancias se caracterizan, primeramente, por una susceptibilidad variable con el campo y, además, por el valor muy elevado de esta susceptibilidad, de forma que la imantación adquirida por la substancia puede ser considerable. La propia substancia crea un campo que no es despreciable frente al campo magnetizante; como es de sentido inverso a este último, lo denominaremos *campo desmagnetizante*. Calculemos su magnitud en el caso de una barra de hierro paralela al campo magnetizante. La barra recibe una imantación I (*fig.* 469) y las cargas en sus extremos son IS y — IS, siendo S la sección de la barra y l su longitud; el campo desmagnetizante en el centro será aproximadamente igual a

$$h = \frac{2 \cdot IS}{\left(\frac{l}{2}\right)^2} = I \cdot \frac{8S}{l^2},$$

y si H es el campo magnetizante,

$$\frac{h}{H} = \frac{I}{H} \cdot \frac{8S}{l^2}.$$

La relación $\frac{I}{H}$ es la susceptibilidad, que en los cuerpos para y diamagnéticos es del orden de 10^{-6}; la relación $\frac{h}{H}$ es despreciable; en los cuerpos ferromagnéticos, $\frac{I}{H}$ puede alcanzar 10^3; el campo h sólo podrá despreciarse cuando la sección S de la barra sea pequeña con respecto a su longitud. Supongamos, en lo que va a seguir, que se cumple esta condición.



Fig. 469

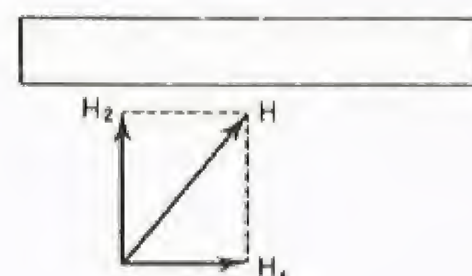


Fig. 470

Si la barra es corta, el campo desmagnetizante es intenso y la imantación pequeña. Consideremos entonces una barra colocada oblicuamente con respecto al campo magnetizante H (*fig.* 470).

El campo $\vec{H}$ puede descomponerse en dos campos $\vec{H_1}$ y $\vec{H_2}$, respectivamente paralelos a la longitud y a la anchura de la barra. El campo $\vec{H_2}$ produce una imantación muy pequeña comparada con la engendrada por el campo $\vec{H_1}$. Podemos decir que un trozo de hierro colocado en un campo magnético cualquiera se imanta según su dimensión mayor, quedando entonces sometido a un par que tiende a colocar esta dimensión mayor paralela al campo H; esto nos explica el fenómeno de los espectros magnéticos. Las partículas de la limadura se imantan en el sentido de su longitud, se colocan paralelas al campo y, a consecuencia de las fuerzas de atracción, se disponen en filas.

Curva de primera imantación. Punto de Curie. — Las propiedades magnéticas de una barra de acero dependen de todos sus estados anteriores: temple, imantación, martillado, etc., pero se comprueba que a una temperatura de 770° C el acero pierde sus propiedades magnéticas. Así, un clavo calentado al rojo ya no es atraído por un imán. Esto permite obtener fácilmente una barra sin imantación, y estudiar los efectos de la primera. La temperatura (770° C para el acero) a la cual un cuerpo pierde sus propiedades magnéticas se llama *punto de Curie*.

Mediremos la imantación que recibe una barra colocándola en el interior de un solenoide recorrido por una corriente y midiendo el campo creado por la barra por medio de un magnetómetro. El valor del campo magnetizante será $\frac{4\pi nI}{10}$ (v. p. 130). La curva de primera imantación varía con la naturaleza del acero empleado. Una de las curvas representadas (*fig.* 471) corresponde al acero dulce, y la otra al acero al temple. Se ha indicado el campo magnetizante en abscisas y la imantación en ordenadas. Esta última es primeramente proporcional al campo, crece después más rápidamente que él y tiende finalmente hacia un límite, límite que se denomina *imantación a saturación* del hierro, y que varía entre 1 400 y 1 800.

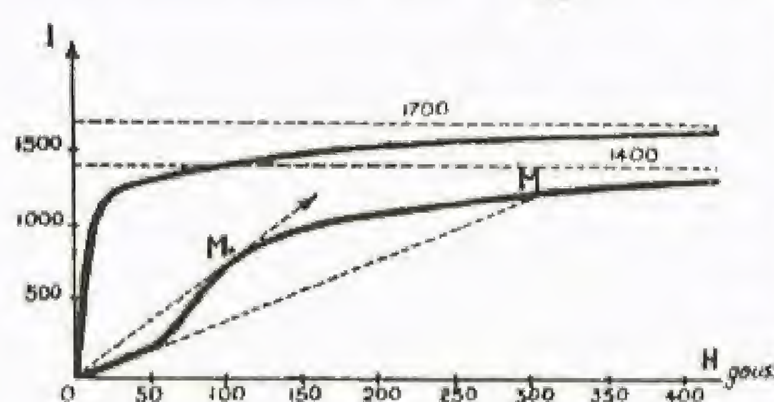


Fig. 471

La susceptibilidad $\varkappa$ es la relación $\frac{I}{H}$, y está representada por la pendiente de la recta que une el origen a un punto M de la curva. Se comprueba fácilmente que comienza creciendo, alcanza un máximo (punto M_0) y finalmente disminuye y tiende hacia cero cuando el campo aumenta indefinidamente. El máximo de susceptibilidad puede llegar a 1 200 en un campo de 0,5 oersted.

Ciclo de histéresis. — Si se disminuye progresivamente el campo magnetizante, después de haber sometido la barra a campos crecientes, se comprueba que para un mismo valor del campo magnetizante la imantación adquirida no es la misma que durante la primera imanta-

ción, sino mayor, y que cuando el campo magnetizante se anula, la imantación conserva un valor diferente de cero: se dice entonces que hay *imantación remanente*. Este fenómeno está representado por la parte AB de la curva de la figura 472; OB es el valor de la imantación remanente y depende de la naturaleza del acero empleado. OA es la curva de primera imantación. Tratemos ahora de anular la imantación de la barra, para lo cual invirtamos el sentido del campo magnetizante y hagámosle crecer progresivamente: entonces se describe la porción de curva BC. En el punto C, la imantación es nula y el campo OC se llama *campo coercitivo*. Si hacemos que este campo continúe aumentando, la barra se imanta en sentido inverso (curva CD) y, para un valor del campo magnetizante igual al que corresponde al punto A (punto D), obtenemos una imantación O*d* igual y de sentido contrario a la imantación O*a*. Operando a partir del punto D de la misma forma que a partir del punto A, obtendríamos sucesivamente las porciones de curva DE, con una imantación remanente OE = OB, y EF, con un campo coercitivo OF = OC, para volver finalmente al punto de partida A, desde el cual se podría comenzar de nuevo y describir el mismo ciclo. Este ciclo se denomina *ciclo de histéresis*. Su forma puede ser variable, pero es siempre una curva que tiene su origen como centro de simetría,

Fig. 472

Los aceros templados tienen un ciclo de histéresis amplio, una imantación remanente del orden de 500 y un campo coercitivo de 40 oersteds, aproximadamente.

Los aceros dulces, es decir, recocidos, tienen un ciclo estrecho y una imantación remanente que puede ser mayor que la de los aceros templados, pero un campo coercitivo del orden de 2 oersteds. Para obtener un imán permanente se utilizará un acero templado, a causa del gran valor del campo coercitivo. En efecto, un imán está siempre sometido a su propio campo, que es desmagnetizante; si el campo coercitivo es del mismo orden que el campo desmagnetizante, el imán se desimantará.

Más adelante se verá cómo se utilizan en las dinamos, alternadores y transformadores aceros con ciclos estrechos de histéresis. Estas aplicaciones son una consecuencia de un fenómeno que expondremos a continuación: el calentamiento por histéresis.

Calentamiento por histéresis. — Consideremos una partícula ferromagnética P situada en un punto A del campo creado por una barra imantada (*fig.* 473). La partícula se imanta; si se la aleja del imán a lo largo de una línea recta, por ejemplo, el campo magnetizante disminuye y se anula cuando la partícula está en el infinito, describiéndose entonces la parte AB del ciclo de histéresis. ¿Se ha efectuado un trabajo al desplazar la partícula P? La contestación es, evidentemente, afirmativa, puesto que una partícula de materia situada en un campo está sometida a una fuerza F, expresada por la fórmula

Fig. 473

$$F = \varkappa\, HV \frac{\delta H}{\delta x} = IV \frac{\delta H}{\delta x},$$

y para un desplazamiento muy pequeño dx, se tendrá un trabajo

$$dT = Fdx = IV \frac{\delta H}{\delta x}\, dx;$$

el trabajo, en el ejemplo considerado, es negativo, ya que el campo disminuye

$$\frac{\delta H}{\delta x} < 0.$$

Invirtamos el imán NS, lo que no exige ningún trabajo, y llevemos la partícula desde el infinito al punto P: el campo magnetizante ha cambiado de sentido, y se describe la parte BD del ciclo de histéresis. Si alejamos nuevamente la partícula, invirtiendo el imán y llevando la partícula al punto P, se completa el ciclo. Todos estos desplazamientos exigen un trabajo positivo o negativo, y la suma de todos estos trabajos no es nula. Para calcularla, consideremos una parte MM' muy pequeña de la curva de histéresis (*figura* 474). para que se describa esta porción de curva habrá que efectuar un trabajo

$$dT = IV \frac{\delta H}{\delta x}\, dx,$$

que puede escribirse $dT = IVdH$; dH es la variación del campo y está representada por

Fig. 474

O*m* — O*m'*, es decir, *mm'*; como MM' es pequeño, la imantación apenas ha variado, de forma que I = m*M* = *m'*H' y se tendrá

$$dT = V \times mM \times mm'.$$

La figura *m*MM'*m'* puede asimilarse a un rectángulo, con lo que se obtiene

$$dT = V \times \text{área } mMM'm'.$$

El trabajo total se obtendrá sumando todos los trabajos elementales; este trabajo T será, pues, el producto por el volumen V de la suma de las áreas tales como *m*MM'*m'*, es decir, el área total del ciclo de histéresis. Por consiguiente, el trabajo T no es nulo, es decir, que hemos vuelto a un estado final idéntico al estado inicial, lo que exige (v. TERMODINÁMICA) la producción de igual cantidad de energía. La experiencia muestra que es energía calorífica, por lo cual podrá enunciarse:

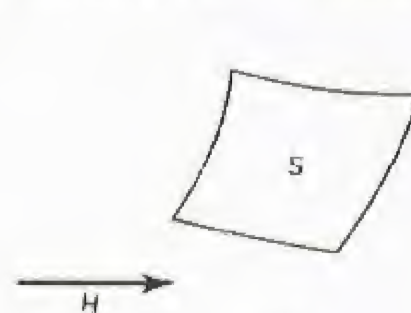


Fig. 475

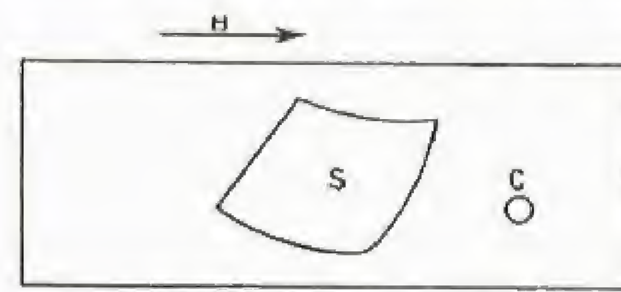


Fig. 476

Cuando una substancia ferromagnética describe un ciclo de histéresis, se calienta, y la energía calorífica producida es proporcional al volumen de la substancia y al área de su ciclo de histéresis.

Permeabilidad magnética. — Consideremos una superficie S (*fig.* 475) situada en un campo magnético $\vec{H}$. Si esta superficie está rodeada por el vacío, será atravesada por un flujo φ. Supongamos ahora que dicha superficie S está rodeada por una substancia ferromagnética (*fig.* 476); esta última substancia se imantará por la influencia del campo H. ¿Cuál será el flujo ϕ que atravesará la superficie S? Para calcularlo sería necesario conocer el campo existente en el interior del imán que constituye la substancia ferromagnética, pero este campo no se ha definido. Se podría calcular en una cavidad c de la materia imantada, cavidad que se supone tan pequeña que no altera en absoluto el campo producido por el resto de la substancia; ahora bien, el campo así calculado depende de la forma de la cavidad; este hecho impide calcular el flujo a través de la superficie S, lo que resulta muy molesto, puesto que el flujo aparece en muchas fórmulas, especialmente en la que permite calcular la acción de un campo magnético sobre una corriente (v. p. 131), y también en la inducción, fenómeno que estudiaremos más adelante. ¿Habrá necesidad de cambiar las fórmulas cada vez que una superficie esté constituida por materia ferromagnética? Afortunadamente, no, porque el fenómeno se produce como si el flujo ϕ fuese igual al flujo φ multiplicado por un coeficiente μ

$$\phi = \mu\,\varphi,$$

y bastará, pues, substituir en las fórmulas el flujo φ por el flujo ϕ. Este coeficiente μ es función de la susceptibilidad magnética y se tendrá

$$\mu = 1 + 4\pi\varkappa.$$

Dado el gran valor de $\varkappa$, se observa que el flujo ϕ puede ser 10 000 veces mayor que el flujo φ, lo que puede expresarse diciendo que las substancias ferromagnéticas concentran el flujo magnético o que son más permeables al mismo; de ahí el nombre de *permeabilidad magnética* que se da al coeficiente μ.

Esta permeabilidad del hierro se pone de manifiesto por una experiencia sencilla. Formemos el espectro magnético de un imán de herradura entre cuyos brazos se ha colocado un trozo de hierro dulce. El espectro se representa en la figura 477; las líneas de fuerza se curvan para penetrar en mayor número en hierro.

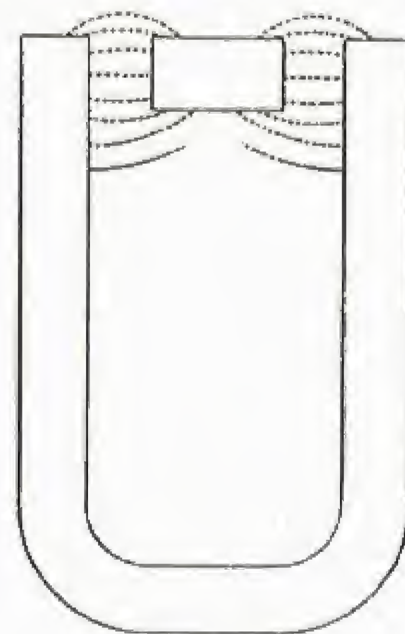


Fig. 477

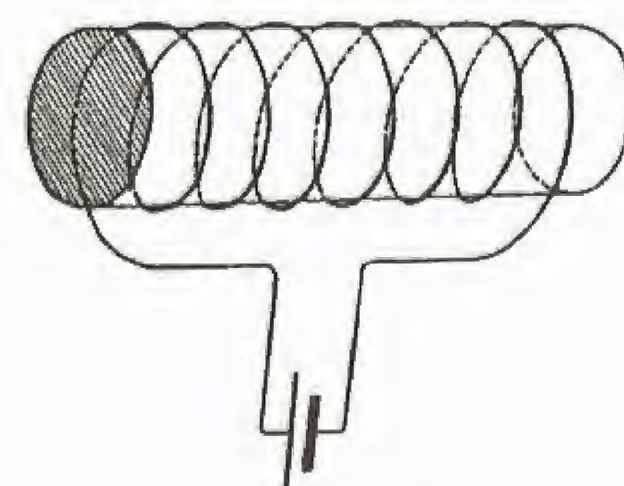


Fig. 478

Para demostrar el resultado anterior, imaginemos un solenoide constituido por un hilo aislado arrollado sobre una barra de acero (*fig.* 478). Si el solenoide es recorrido por una corriente equivaldrá, como sabemos, a un imán, cuyo momento magnético M_1 vamos a calcular. Situado en un campo h, el solenoide está sometido a un par cuyo momento tiene por valor (v. pág. 132).

$$C = \frac{I}{10}\frac{d\varphi}{d\alpha}.$$

Si S es la superficie de una espira, el flujo que la atraviesa valdrá

$$\varphi_1 = Sh \cos \alpha,$$

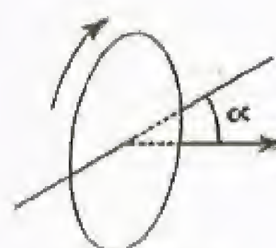


Fig. 479

con las notaciones habituales (*fig.* 479). Si hay N espiras, el flujo total será $\varphi = NSh \cos \alpha$, y, en valor absoluto, se tendrá

$$|C| = +\frac{I}{10} NSh \operatorname{sen} \alpha;$$

comparando con la fórmula $C = MH \operatorname{sen} \alpha$ establecida en magnetismo, se deduce el momento magnético del solenoide:

$$M_1 = \frac{I}{10} NS.$$

La barra de acero situada en el solenoide está sometida al campo $\vec{H}$ que él crea, y recibe una imantación

$$I = \varkappa H;$$

las masas magnéticas de sus extremos son, respectivamente, iguales a $+ IS$ y $- IS$; si l es su longitud, su momento magnético será

$$M_2 = ISl = \varkappa H \times S \times l.$$

Como $H = 4\pi n \frac{I}{10}$ (v. p. 411), en donde n es el número de espiras por centímetro: $n = \frac{N}{l}$, de donde

$$M_2 = \varkappa \cdot 4\pi \cdot \frac{N}{l} \cdot \frac{I}{10} \cdot S \cdot l,$$

$$M_2 = \varkappa \cdot 4\pi\, N \cdot \frac{I}{10} \cdot S.$$

Como los momentos magnéticos de la barra y del solenoide son paralelos, el momento del sistema será

$$M = M_1 + M_2 = \frac{I}{10} NS + \frac{I}{10} NS \cdot 4\pi\varkappa$$

o bien

$$M = \frac{I}{10} NS\,(1 + 4\pi\varkappa).$$

Todo sucede como si el momento M_1 del solenoide se hubiera multiplicado por el coeficiente $\mu = 1 + 4\pi\varkappa$, o también como si el flujo φ que atraviesa el solenoide se hubiera multiplicado por μ, ya que

$$M_1 = \frac{C}{h \operatorname{sen} \alpha} = \frac{\frac{I}{10} \cdot \frac{d\varphi}{d\alpha}}{h \operatorname{sen} \alpha};$$

si el flujo se multiplica por μ, su derivada queda también multiplicada y, por consiguiente, también M_1.

Las variaciones de la permeabilidad con el campo magnetizante pueden deducirse fácilmente teniendo en cuenta lo que ya se ha dicho acerca de la susceptibilidad $\varkappa$ (v. p. 133). Para los campos débiles, la permeabilidad crece, pasa por un máximo del orden de 10 000 y después decrece, tendiendo hacia la unidad.

Aleaciones de altas permeabilidades. — Se obtienen permeabilidades máximas muy elevadas con hierro muy puro. Por ejemplo, el hierro con 0,0045 por 100 de carbono tiene una permeabilidad de 19 000, habiéndose llegado incluso a una permeabilidad de 1 000 000 con hierros todavía más puros y recocidos muy lentamente.

No obstante, se obtienen resultados análogos y de forma más sencilla con las aleaciones de hierro y níquel. Estas aleaciones son el mu-metal, que contiene 76 por 100 de níquel, 17 por 100 de hierro, 5 por 100 de cobre y 2 por 100 de cromo, y cuya permeabilidad máxima llega hacia 100 000. El permaloy, con 78,5 por 100 de níquel, tiene un ciclo de histéresis muy estrecho, siendo su campo coercitivo de 0,035 gauss. Los aceros al silicio con muy poco manganeso (lo menos posible), tienen también un ciclo de histéresis muy estrecho, aunque mucho más amplio que el del permalloy. Son utilizados en la construcción de transformadores.

Teoría del magnetismo. — Un electrón que circula por su órbita en un átomo (v. TEORÍAS MODERNAS, pág. 151) constituye una corriente eléctrica que produce un campo magnético. Si las órbitas están dispuestas de forma que los momentos magnéticos se anulen, el átomo carecerá de momento magnético. Si se sitúa entonces este átomo en un campo magnético, se modificará la velocidad de los electrones y se producirá un momento magnético opuesto al campo (ley de Lenz). Éste es el fenómeno del diamagnetismo. Los cuerpos diamagnéticos, como el bismuto y el agua, tienen una susceptibilidad magnética negativa.

Supongamos ahora que el átomo tenga, en ausencia de todo campo magnético, un momento magnético permanente. Si no existe campo alguno, los momentos de los diferentes átomos tienen todas las orientaciones posibles, y la resultante es nula para un trozo de substancia que contenga gran número de átomos. Si se coloca esta substancia en un campo magnético, los momentos de los diferentes átomos tenderán a orientarse en el sentido del campo y habrá un momento magnético resultante no nulo y en el sentido del campo: éste es el paramagnetismo. La agitación molecular dificulta la orientación de los momentos magnéticos; en realidad, las susceptibilidades magnéticas de las substancias paramagnéticas son del orden de 10.

Queda el caso particular del ferromagnetismo con susceptibilidades de diez mil a un millón de veces mayores. Se supone que en pequeños volúmenes que contienen de diez mil a un millón de átomos los momentos magnéticos de estos átomos son paralelos entre sí. Cuando se hace actuar un campo magnético, todos estos momentos siguen permaneciendo paralelos y se orientan en el sentido del campo, de donde se obtiene un momento magnético resultante mucho mayor que en el caso del paramagnetismo simple.

Inducción magnética. — Decir que el flujo que atraviesa una superficie ferromagnética queda multiplicado por μ, equivale a decir que es el flujo a través de esta superficie de un vector $\vec{B}$ producto del campo $\vec{H}$ por el coeficiente μ. Este vector ha recibido el nombre de *inducción magnética;* se tiene:

$$\vec{B} = \mu\vec{H} = \vec{H}\,(1 + 4\pi\varkappa)$$

o también

$$\vec{B} = \vec{H} + 4\pi\varkappa\vec{H}$$

o bien, por último,

$$\vec{B} = \vec{H} + 4\pi\vec{I}.$$

Esta última fórmula es la más general y puede aplicarse incluso si la imantación $\vec{I}$ no es paralela al campo $\vec{H}$; $\vec{B}$ es entonces la suma de dos vectores no paralelos, $\vec{H}$ y $4\pi\vec{I}$. Se demuestra que, incluso en este caso, el flujo del vector $\vec{B}$ es conservativo; es nulo a través de una superficie cerrada, pero entonces $\vec{B}$ no deriva de un potencial, ya que, si bien el campo $\vec{H}$ deriva de un potencial, no puede ocurrir lo mismo para $\vec{I}$, que tiene un valor cualquiera.

Obsérvese que en el vacío (o, aproximadamente, en el aire) $\mu = 1$ y, por consiguiente, $\vec{B} = \vec{H}$, de forma que para mayor uniformidad en el lenguaje se hablará únicamente de *flujo de inducción magnética,* ya esté la superficie considerada en el vacío o en una materia imantada.

Las líneas de fuerza del campo del vector $\vec{B}$ se denominarán *líneas de fuerza de la inducción magnética,* y pueden trazarse tanto en el aire, donde se confunden con las del campo, como en la materia imantada. Se demuestra que, a consecuencia del gran valor de la permeabilidad, las líneas de inducción son, en el aire, normales a la superficie de la materia imantada. Como el flujo de inducción es conservativo, su valor es el mismo a través de todas las secciones de un mismo tubo de fuerza.

Electroimanes. — Un electroimán está constituido por una armazón de hierro sobre la cual se ha arrollado un circuito eléctrico. Al pasar la corriente, el hierro se imanta y el campo que produce se añade al creado por la corriente. La forma de los electroimanes es muy variable según su utilización. Las dinamos, la telegrafía y los timbres eléctricos llevan electroimanes; también se les emplea para levantar grandes objetos de hierro o de acero; por último, los electroimanes sirven para producir campos magnéticos intensos. Para este último empleo se les da una forma curva, como muestra esquemáticamente la figura 480. N y S son los polos del electroimán, y el espacio E se llama *entrehierro;* este entrehierro se hace lo más estrecho posible para que en él aumente la intensidad del campo. En el gran electroimán de Bellevue, que pesa 120 toneladas, se ha podido obtener un campo de 50 000 oersteds, aproximadamente, en un volumen de 20 cm³.

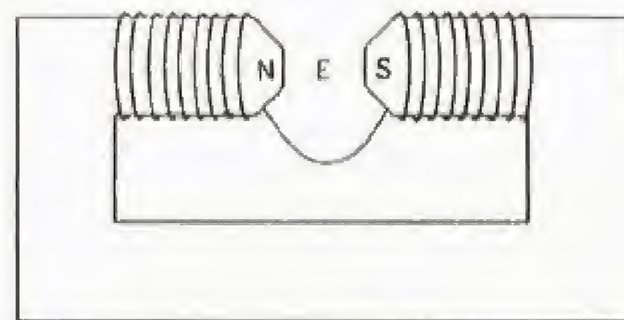
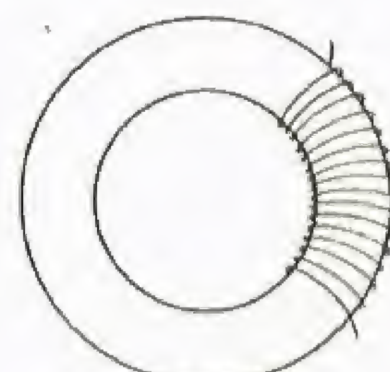


Fig. 480


Fig. 481

Para obtener campos todavía más intensos se utilizan circuitos recorridos por corrientes muy intensas. De esta forma, Kapitza pudo obtener durante una centésima de segundo un campo de 300 000 oersteds, por medio de un solenoide recorrido por una corriente de 72 000 amperios.

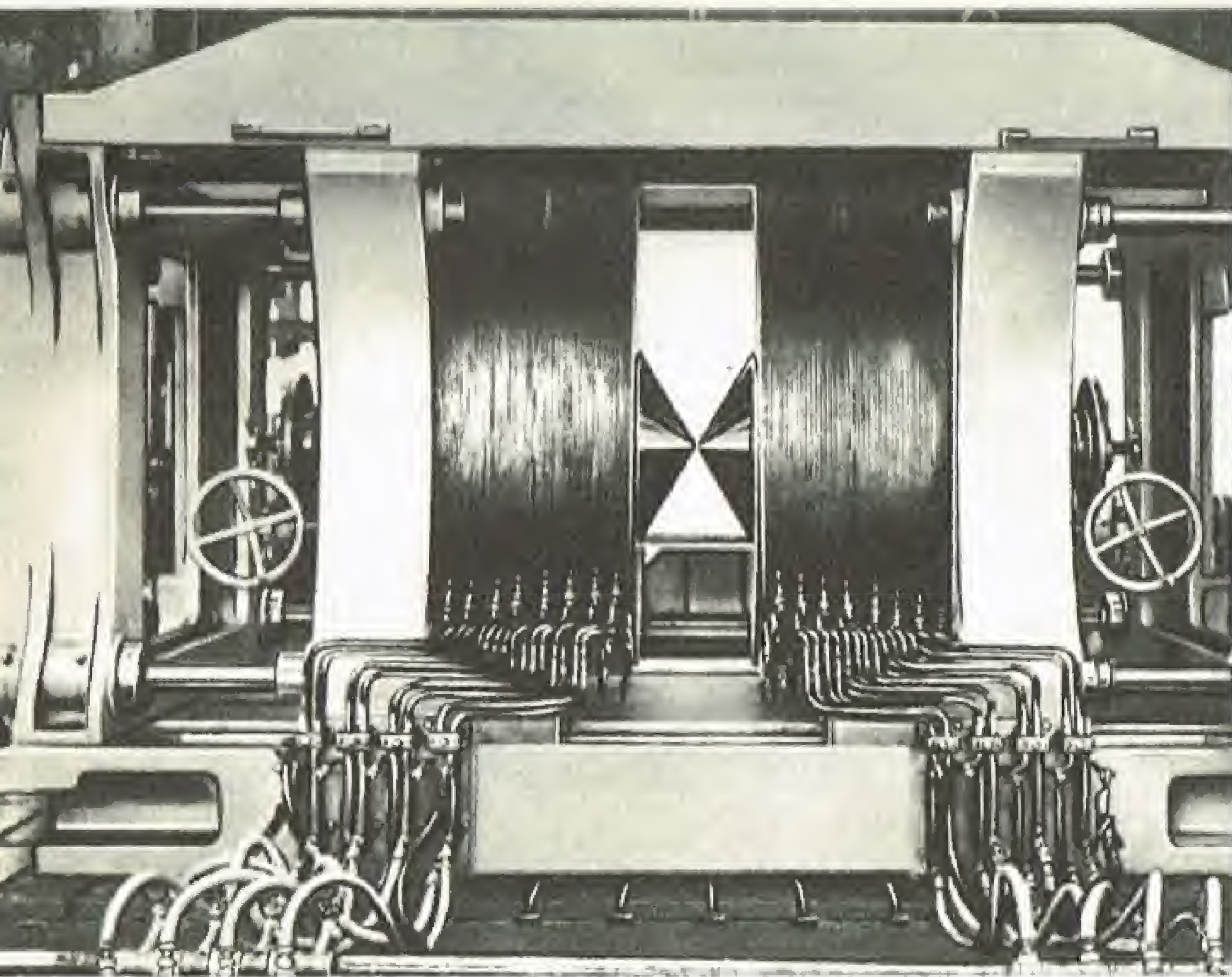
Circuitos magnéticos. — Sea un anillo de hierro dulce al cual se arrolla un circuito eléctrico (*fig.* 481); al pasar la corriente, el hierro se imanta, pero no aparece masa magnética libre en ningún punto. Calculemos el flujo que atraviesa una sección del anillo; el campo H creado por la corriente es el mismo que el de un solenoide de igual longitud l con el mismo número de espiras N:

$$\vec{H} = \frac{N}{l} \frac{I}{10}.$$

La inducción es $\vec{B} = \mu \times 4\pi \frac{N}{l} \frac{I}{10}$

y el flujo que pasa a través de la sección S del anillo

$$\phi = BS = 4\pi N \frac{I}{10} \times \mu \times \frac{S}{l}.$$



El gran electroimán de Bellevue (Francia): vista de conjunto del lado de las conexiones *(Documento C. N. R. S.)*

Hagamos $R = \frac{1}{\mu}\frac{l}{S}$, de donde $\phi = \frac{4\pi N \frac{I}{10}}{R}$.

Esta fórmula es análoga a la ley de Ohm $I = \frac{E}{R}$, por lo que se denomina *fuerza magnetomotriz* la cantidad $4\pi N \frac{I}{10}$ y *resistencia megnética* o *reluctancia* la cantidad $R = \frac{1}{\mu}\frac{l}{S}$.

Hagamos un corte en el anillo de hierro (*fig.* 482); entonces aparecen masas magnéticas libres y en el espacio E existe un campo H, que se calcula por la fórmula

$$H = B = \frac{\phi}{S}.$$

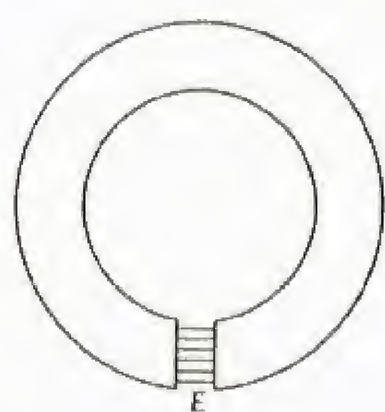


Fig. 482

El flujo ϕ no es el mismo que el anterior, ya que suponiendo que la fuerza magnetomotriz no haya variado, habrá que añadir a la reluctancia R del anillo de hierro la reluctancia R′ del corte E; se tendrá

$$R' = \frac{l'}{S}$$

si l' es la longitud del corte. R′ es, evidentemente, mucho mayor que R, ya que como μ es muy grande, $\frac{1}{\mu}$ es muy pequeño; finalmente se obtiene

$$H = \frac{1}{S} \cdot \frac{4\pi N \frac{I}{10}}{R + R'}.$$

Esta fórmula muestra que para tener un campo muy intenso hace falta una reluctancia total R + R′ pequeña y una fuerza magnetomotriz grande; el producto N I que la caracteriza se denomina número de *amperios-revoluciones magnetizantes*.

Las fórmulas precedentes, establecidas para un caso particular, son válidas, por lo menos en primera aproximación, para un electroimán cualquiera; de ahí su interés.

Inducción

Definición. Ley de Lenz. Las corrientes inducidas fueron descubiertas por Faraday y pueden definirse como *corrientes producidas, en un circuito cerrado, por una variación cualquiera del flujo de inducción magnético que lo atraviesa.* Se comprueba que *la corriente tiene la misma duración que la variación del flujo.* El sentido de la corriente se obtiene por la *ley de Lenz: el sentido de la corriente inducida es tal que ésta se opone a la causa que la produce.*

Estudio experimental. — Aproximemos el polo norte N de un imán a una bobina B que contiene en su circuito un aparato capaz de detectar una corriente pequeña (galvanómetro). El flujo que atraviesa la bobina aumenta, pasando una corriente cuyo sentido es el indicado por la figura 483. La bobina recorrida por esta corriente es equivalente a un imán, cuyo polo norte está dirigido al polo norte N del imán: este polo es rechazado. Si se aleja el imán, la bobina será recorrida por una corriente de sentido inverso: el polo norte del imán es entonces atraído. En ambos casos puede comprobarse perfectamente que el sentido de la corriente inducida se opone a la causa que la origina; de aquí el desplazamiento del imán. También puede decirse, que: *el desplazamiento relativo de un imán y de un circuito cerrado crea una corriente inducida tal que las fuerzas que de ella se derivan se oponen a este desplazamiento.*

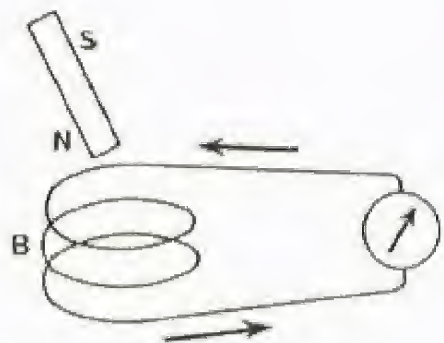


Fig. 483

En la experiencia anterior puede reemplazarse el imán NS por un solenoide recorrido por una corriente o por un circuito de forma cualquiera; la naturaleza de los fenómenos permanece invariable. También puede llenarse la bobina B con hierro dulce; la corriente inducida, en igualdad de condiciones, es mayor, lo que demuestra que lo que interviene es la variación del flujo de inducción y no la variación del flujo magnético.

Es posible obtener variaciones del desplazamiento. He aquí un ejemplo: coloquemos sobre una bobina B (*fig.* 484) análoga a la que ya se ha utilizado un solenoide S recorrido por una corriente y colocado en serie con un reóstato R. Por medio de este reóstato, hagamos que varíe la intensidad I del solenoide y, por consiguiente, el campo magnético creado, así como el flujo de inducción a través de la bobina B: esta bobina es entonces recorrida por una corriente. ¿Cómo puede aplicarse la ley de Lenz? La causa que produce la corriente es una variación de la intensidad del solenoide; la corriente inducida debe oponerse a esta variación. Si la intensidad disminuye, por ejemplo, la corriente inducida provoca en S una variación de flujo tal que crea una corriente que se añade a la ya existente, de forma que aumenta la intensidad. Otro ejemplo es el que proporciona el carrete de Ruhmkorff (v. p. 149).

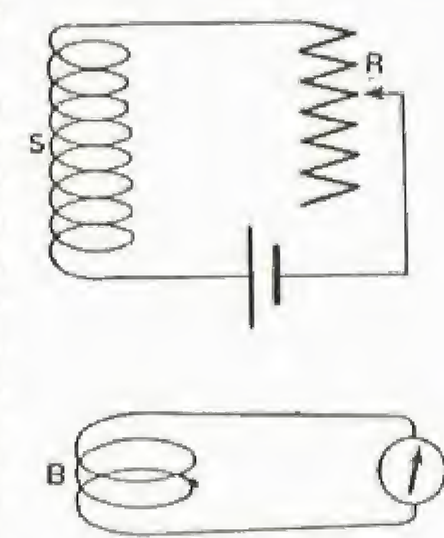


Fig. 484

Todavía puede darse otro ejemplo de inducción sin desplazamiento. La bobina B (*fig.* 485) se arrolla sobre un brazo de un electroimán de herradura. Por medio de una barra de hierro dulce se unen los polos del imán, lo que tiene por efecto disminuir la reluctancia y, por consiguiente, aumentar el flujo. La bobina B es recorrida por una corriente que al oponerse al aumento del flujo crea un campo desmagnetizante.

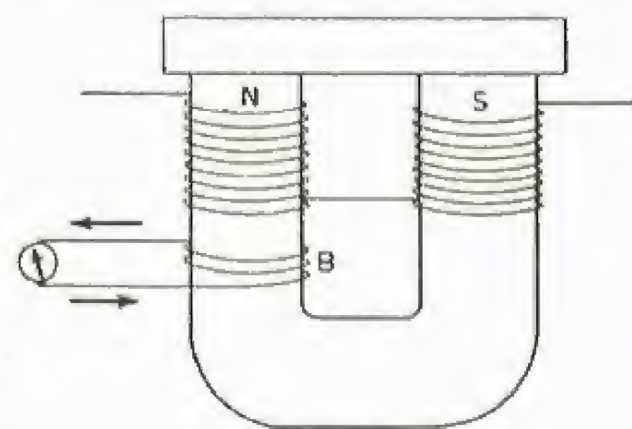


Fig. 485

Los ejemplos podrían multiplicarse. En todos los casos, el sentido de la corriente inducida viene dado por la ley de Lenz, aunque algunas veces es más cómodo utilizar la siguiente regla de Maxwell:

El sentido de la corriente inducida es el que hay que imprimir a un sacacorchos para que avance:

a) *en el sentido de las líneas de inducción si el flujo disminuye;*

b) *en el sentido inverso al de las líneas de inducción, si el flujo aumenta.*

Corrientes de Foucault. — Las corrientes de inducción se producen tanto en una masa conductora cualquiera como en un circuito filiforme. Estas corrientes se denominan entonces *corrientes de Foucault.* Para comprobar su existencia, basta con desplazar un disco de cobre en el entrehierro de un electroimán. Las corrientes que se inducen en él se oponen al desplazamiento, de forma que sentimos una gran dificultad para mover el disco. Se comprueba al mismo tiempo que se calienta como consecuencia del efecto Joule.

F. e. m. de inducción. Ley fundamental. — Las corrientes inducidas son debidas a una f. e. m., denominada f. e. m. de inducción. La experiencia muestra que:

La f. e. m. de inducción es proporcional a la derivada con respecto al tiempo del flujo de inducción magnética. Es independiente de la resistencia del circuito y de la intensidad de la corriente que lo recorre.

Esto se expresa por la fórmula

$$e = k \frac{d\phi}{dt}.$$

Este coeficiente k depende de las unidades escogidas y es siempre negativo. Convengamos, en efecto, contar positivamente las f. e. m. de inducción cuando la corriente inducida recorre el circuito en un sentido escogido arbitrariamente. En el circuito C de la figura 486 se ha indicado el sentido positivo y las líneas de inducción. Con nuestras convenciones sobre el signo del flujo, éste será positivo en el caso considerado: $\phi > 0$. Supongamos que aumente $\frac{d\phi}{dt} > 0$; se producirá entonces una corriente inducida que recorrerá el circuito en el sentido negativo y se tendrá $e < 0$; por consiguiente, e y $\frac{d\phi}{dt}$ son de signos contrarios. Se vería que ocurre así en todos los casos, cualquiera que sea el sentido positivo escogido sobre el circuito.

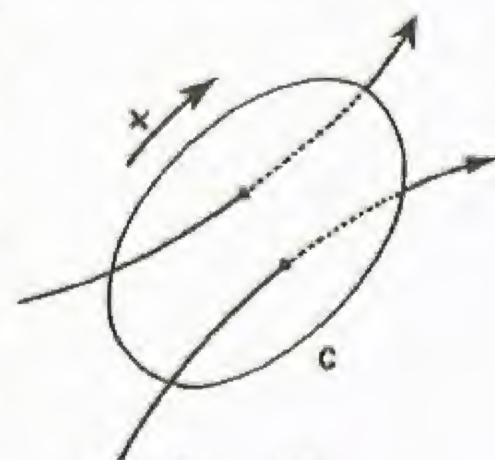


Fig. 486

Si se utilizan las unidades voltio y maxwell, el valor absoluto del coeficiente k es $\frac{1}{10^8}$. Se tendrá, pues,

$$e = -\frac{1}{10^8}\frac{d\phi}{dt} = -10^{-8}\frac{d\phi}{dt}.$$

En el sistema práctico M.K.S.A., se escoge K = 1, relación que define la unidad práctica de flujo, el *weber:* es el flujo que atraviesa un circuito si su desaparición en 1 segundo produce una f. e. m. de inducción de 1 voltio.

Cantidad de electricidad inducida. — De la ley precedente se deduce que la intensidad de la corriente inducida en un circuito de resistencia de r ohmios es, en amperios,

$$i = +\frac{e}{r} = -10^{-8}\frac{1}{r}\frac{d\phi}{dt}.$$

La *cantidad de electricidad* inducida durante un tiempo dt es

$$dq = idt = -10^{-8}\frac{1}{r}d\phi;$$

luego si entre dos instantes t_1 y t_2 el flujo ha pasado del valor ϕ_1 al valor ϕ_2, el circuito ha sido recorrido por la cantidad de electricidad

$$q = -10^{-8}\frac{1}{r}(\phi_2 - \phi_1) = 10^{-8}\frac{\phi_1 - \phi_2}{r}.$$

Los flujos ϕ_1 y ϕ_2 son los flujos totales que han atravesado el circuito, es decir, que comprenden tanto el flujo inductor como el creado por la corriente inducida. Podremos prescindir de este último tomando instantes t_1 y t_2 en que la corriente inducida sea nula. Por ejemplo, t_1 es anterior a la variación del flujo inductor y t_2 posterior.

La fórmula antes establecida permite medir una variación del flujo midiendo una cantidad de electricidad, y recíprocamente.

Autoinducción. — Una corriente eléctrica es siempre atravesada por el flujo del campo que crea. Este campo es proporcional a la intensidad, y lo mismo ocurre para el flujo, pudiendo escribirse

$$\phi = L \times I.$$

L es un coeficiente que depende de la forma del circuito. Si la intensidad de la corriente variara, lo mismo ocurriría con el flujo: en el circuito se crearía una corriente inducida de sentido contrario o del mismo sentido que la corriente primitiva, según la intensidad aumentara o disminuyera. Esta inducción de una corriente sobre sí misma lleva el nombre de *autoinducción* o *self-inducción*, y el coeficiente L de la fórmula precedente, el de coeficiente de autoinducción, o más sencillamente, *self*.

La f. e. m. de autoinducción es, en unidades electromagnéticas,

$$e = -\frac{d(LI)}{dt}$$

o, si el circuito es indeformable,

$$e = -L\frac{dI}{dt}$$

Para que esta fórmula conserve su aspecto sencillo en unidades prácticas, se define la unidad práctica de autoinducción como el *coeficiente de autoinducción de un circuito tal que una variación de corriente de un amperio por segundo produzca en él una f. e. m. de inducción de un voltio.* Esta unidad es el henrio.

Cuando se corta una corriente, la intensidad pasa bruscamente del valor I al valor O, y $\frac{dI}{dt}$ es grande; lo mismo ocurrirá con la f. e. m. inducida si el coeficiente de autoinducción es grande. En el circuito se produce una corriente inducida del mismo sentido que la corriente primitiva, corriente que puede ser lo suficientemente fuerte para provocar una chispa en el interruptor. En ciertos casos, por ejemplo en el de los circuitos de los grandes electroimanes, el fenómeno puede llegar a ser peligroso, por lo cual la corriente de estos grandes electroimanes sólo se corta gradualmente.

Cuando se cierra un circuito, se produce una corriente inducida que tiende a impedir el establecimiento de la corriente.

Aplicaciones de los fenómenos de inducción. — Pronto se estudiarán los generadores de corriente continua, que constituyen, con los alternadores y transformadores, las aplicaciones más importantes de la inducción. Expondremos brevemente un método muy preciso para medir la inclinación del campo terrestre. Una bobina plana que girara alrededor de un eje paralelo al campo magnético terrestre estaría constantemente atravesada por un flujo nulo, y no se produciría en ella corriente inducida alguna. Pero si el eje de la bobina no es rigurosamente paralelo al campo terrestre, hay producción de tales corrientes. Para medir la inclinación del campo terrestre se dispondrá, pues, de tal bobina (*fig.* 487), en cuyo circuito se colocará un aparato que permita detectar las pequeñas corrientes, y se obtendrá por tanto la posición del eje para la cual la corriente inducida provocada por la rotación de la bobina es nula.

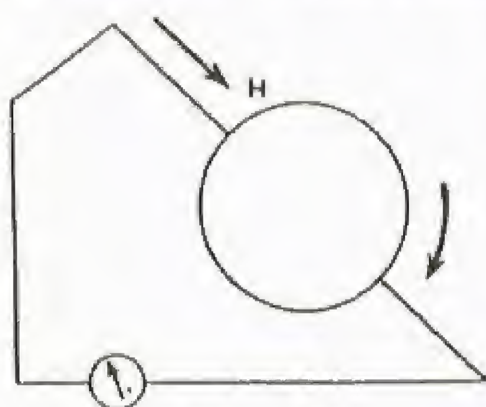


Fig. 487

Aparatos de mediciones eléctricas

Aparatos de imán móvil

Generalidades. — Como se ha dicho en electrostática, se podría distinguir entre instrumentos de mediciones absolutas y aparatos que permiten mediciones relativas. Se estudiará de momento sólo estos últimos, que son: los *galvanómetros* y los *amperímetros*, para medir las intensidades de corrientes; los *voltímetros*, para las diferencias de potencial; los *galvanómetros balísticos*, para las cantidades de electricidad, y los *flúxmetros*, para las variaciones de flujo. Los galvanómetros se distinguen de los amperímetros porque su *sensibilidad* es mayor, es decir, porque miden o detectan corrientes muy pequeñas. Todos estos aparatos son aplicaciones de las leyes del electromagnetismo. Estudiaremos primeramente los que utilizan la acción de una corriente sobre un imán, que son los *aparatos de imán móvil*.

Galvanómetro de imán móvil. — La figura 488 representa el más sencillo de estos aparatos, llamado *brújula de tangentes*. Está constituido por una bobina B formada por varias espiras y recorrida por la corriente que hay que medir. En el centro de la bobina, y en el plano horizontal, se encuentra un imán pequeño ns, móvil alrededor del eje vertical. Una aguja A de aluminio está fijada sobre el imán perpendicularmente a la línea de los polos, y sus extremos se desplazan ante una graduación circular.

Supongamos que el aparato se orienta de forma que la bobina B se encuentre en el plano del meridiano magnético. Cuando no hay corriente, el imán ns (*fig.* 489) se orienta según el campo terrestre H, es decir, en el plano de la bobina. Cuando pasa una corriente por B, crea en su centro un campo magnético h dirigido según el eje de la bobina y, por lo tanto, perpendicular a H. El imán ns se orienta entonces en la dirección de la componente de los dos campos h y H, girando un ángulo

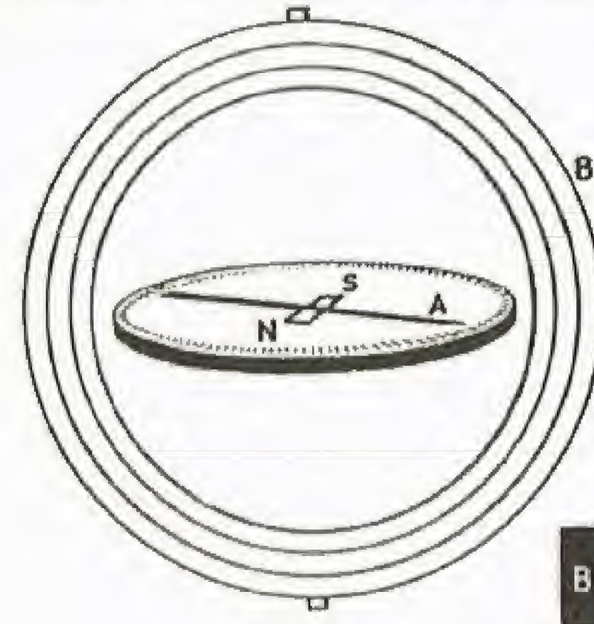


Fig. 488

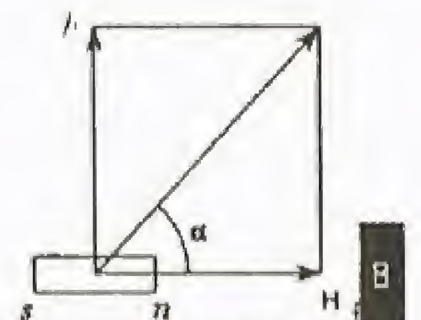


Fig. 489

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{H},$$

ángulo que se mide por medio de la aguja de aluminio A. El campo h es proporcional a la intensidad de la corriente que circula por la bobina:

$$h = Ki,$$

de donde

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{Ki}{H}.$$

El conocimiento de α permite conocer i, si se ha graduado el aparato, o si se puede calcular la constante K.

Se llama **sensibilidad** *del aparato la relación entre la desviación* α *y la intensidad* i:

$$\sigma = \frac{\alpha}{i} = \frac{\operatorname{tg}\alpha}{i} = \frac{K}{H}.$$

Si se aumenta K y se disminuye H, se aumenta la sensibilidad, es decir, el aparato podrá medir corrientes muy pequeñas.

La constante K es sensiblemente igual a $\frac{2N\pi}{10R}$, en donde N es el número de espiras de la bobina y R el radio medio. Se aumentará K disminuyendo el radio R y aumentando el número de espiras, pero no se puede abusar de este procedimiento, porque la resistencia del aparato llega a ser un obstáculo. Para disminuir el campo H basta crear, por medio de un imán, un campo de sentido inverso. También puede recurrirse a

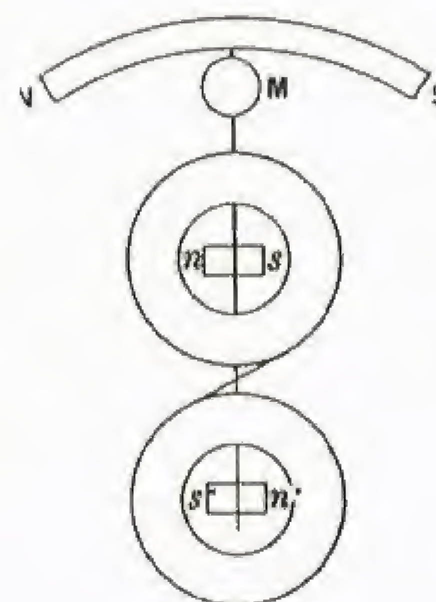


Fig. 490

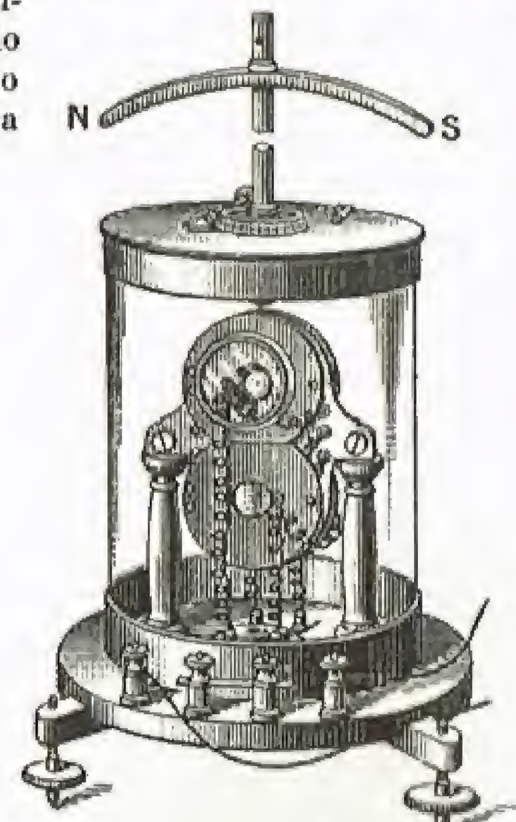


Fig. 491

un artificio debido a lord Kelvin; el imán *ns* es reemplazado por un equipo astático formado por dos imanes idénticos *ns* y *n's'* (*figura* 490), arrollando una bobina alrededor de cada imán. La acción del campo terrestre sobre el equipo es nula, y se la sustituye por la de un imán NS más próximo de la bobina que el otro. La sensibilidad de este aparato llamado *galvanómetro de lord Kelvin* (*fig.* 491), es grande, porque se dispone de dos bobinas en vez de una y, por otra parte, la acción directriz del imán NS es pequeña. La rotación del equipo *ns*, *n's'* se mide por medio de un pequeño espejo M. Con este aparato se puede detectar una corriente de 10^{-12} amperios.

Amperímetros de imán móvil. — Los amperímetros sirven para medir corrientes del orden de 1 amperio o más. Deben ser sólidos y de manejo cómodo, condiciones que no reúnen los galvanómetros.

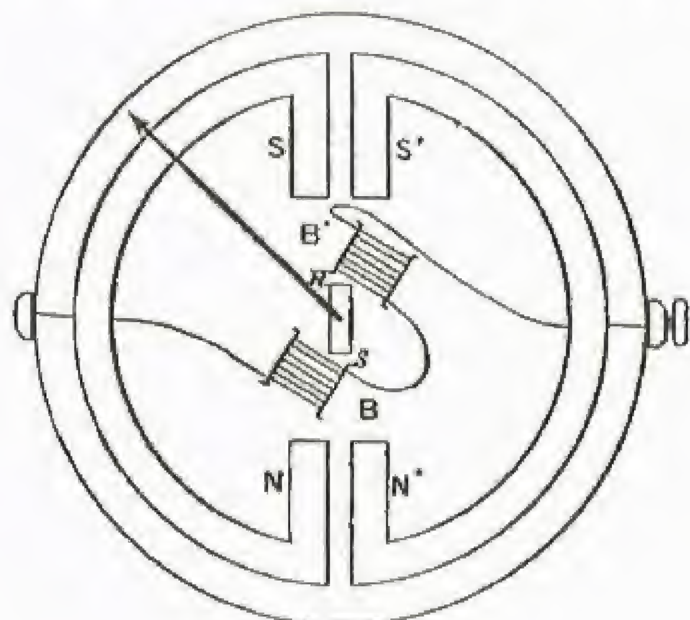


Fig. 492

El principio de los amperímetros de imán móvil es el mismo que el de los galvanómetros, pero la construcción es completamente diferente. La figura 492 representa el esquema de uno de estos aparatos. Cuando no pasa corriente, el imán móvil *ns* es orientado por un par de imanes fijos NS, N'S'. Cuando pasa la corriente, el imán tiende a colocarse según el eje común de las dos bobinas B y B' y se orienta según la resultante de los dos campos, determinándose sus desplazamientos por medio de una aguja. El aparato se gradúa calibrándolo.

Esta clase de amperímetro está polarizado, es decir, que debe hacerse pasar la corriente siempre en el mismo sentido, cosa fácilmente comprensible, ya que si se invierte el sentido de la corriente, el campo que crea cambia también de sentido y la aguja tiende a girar en el sentido contrario al habitual. Los amperímetros térmicos no están polarizados.

Conviene verificar de vez en cuando la graduación de un amperímetro de imán móvil, ya que los *imanes directores* NS, N'S' se desimantan espontáneamente.

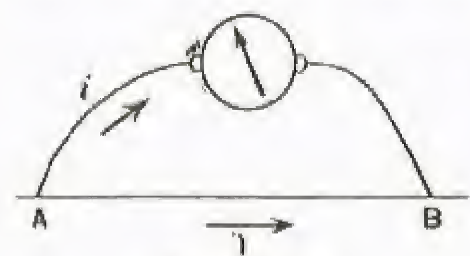


Fig. 493

Voltímetros. — Supongamos que en lugar de colocar un amperímetro en el circuito lo colocáramos en derivación entre dos de sus puntos A y B (*fig.* 493). Si la resistencia R del amperímetro es grande, la corriente *i* que lo atraviesa es pequeña con respecto a la corriente principal I. Esta última ha variado poco, y la diferencia de potencial $V_A - V_B$ es sensiblemente la misma que si se hubiera suprimido el amperímetro. Como se tiene

$$V_A - V_B = Ri,$$

la diferencia de potencial entre los puntos A y B es proporcional a la indicación que da el amperímetro. Bastará, pues, para transformar este último en voltímetro, graduarlo en voltios. Por consiguiente:

Un voltímetro es un amperímetro de gran resistencia graduado en voltios. La gran resistencia del aparato se consigue colocándolo en serie con una resistencia conveniente.

Aparatos de cuadro móvil

Galvanómetros de cuadro móvil. — Estudiaremos ahora los instrumentos de medición que utilizan la acción de un campo sobre una corriente: son los *aparatos de cuadro móvil*. El principio de estos aparatos es el siguiente: se coloca un circuito rectangular ABCD, suspendido de un hilo de torsión EF (*fig.* 494), en un campo magnético. El cuadro, en reposo, permanece paralelo al campo. Desde el momento en que pasa una corriente, el cuadro tiende a colocarse perpendicularmente a las líneas de fuerza del campo, impidiéndoselo la torsión del hilo EF; adopta entonces una posición tal que el par electromagnético de momento C resulta igual al par de torsión de momento C'.

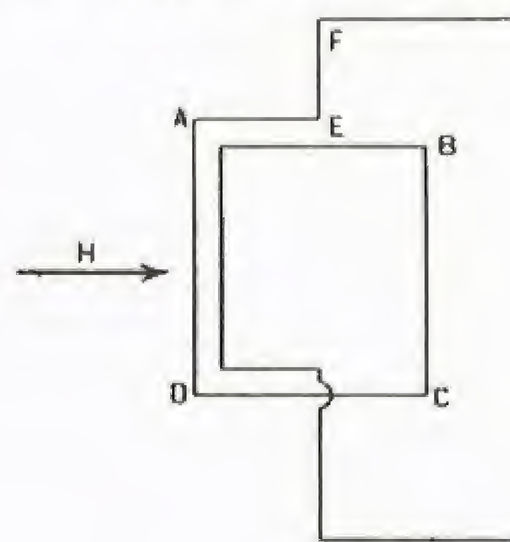


Fig. 494

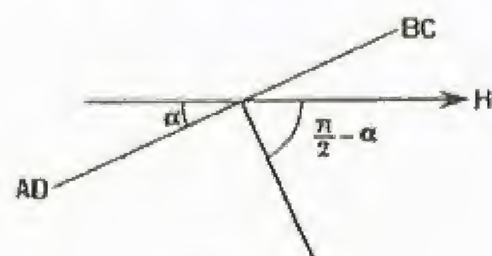


Fig. 495

El momento C' es sensiblemente proporcional al ángulo α que ha girado el cuadro (*fig.* 495).

$$C' = K\alpha.$$

El momento C se expresa por la fórmula $C = \frac{I}{10}\frac{d\varphi}{d\alpha}$. Sea φ_0 el flujo máximo ($\alpha = 90°$); se tiene

$$\varphi = \varphi_0 \operatorname{sen} \alpha,$$

de donde

$$C = \frac{I}{10} \cdot \varphi_0 \cos \alpha.$$

Para desviaciones pequeñas se tiene prácticamente $\cos \alpha = 1$, y la condición de equilibrio del cuadro $C = C'$ se convierte en

$$K\alpha = \frac{I}{10}\varphi_0,$$

de donde

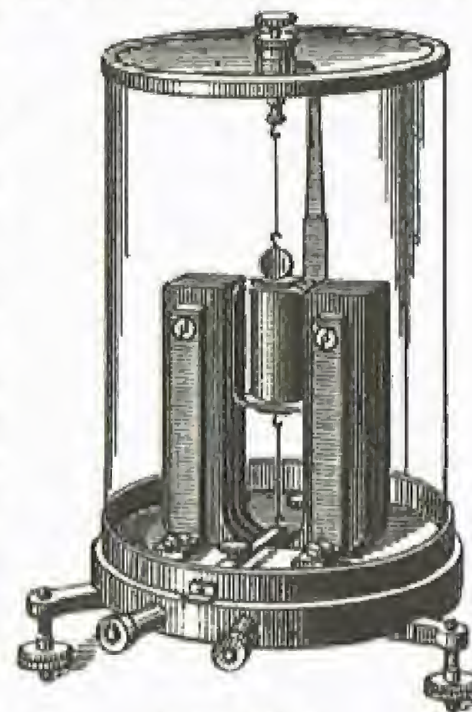
$$\alpha = \frac{1}{10} \cdot \frac{\varphi_0}{K} \cdot I.$$

La desviación es sensiblemente proporcional a la intensidad de la corriente.

La *sensibilidad* es

$$\sigma = \frac{\alpha}{I} = \frac{1}{10} \cdot \frac{\varphi_0}{K},$$

y será tanto mayor cuanto mayor sea φ_0 y menor la *constante de torsión K*. Estas condiciones se cumplen en el tipo más corriente de galvanómetro de cuadro móvil, el *galvanómetro Deprez-d'Arsonval* (*figura* 496), que se representa esquemáticamente en la figura 497. La sección del cuadro es lo mayor posible y contiene gran número de arrollamientos. El campo es creado por un potente imán de herradura. El flujo de inducción se hace todavía mayor introduciendo en el interior del cuadro un núcleo de hierro dulce F cilíndrico, fijo. El cuadro está suspendido de un hilo de plata y los desplazamientos se miden por el método de Poggendorff.


Fig. 496

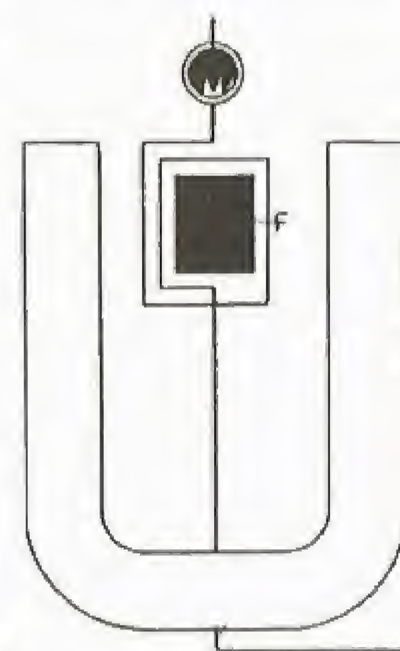


Fig. 497

El cuadro no toma inmediatamente su posición de equilibrio, sino que oscila, pero como se desplaza en un campo magnético, produce corrientes de inducción que se oponen al movimiento, de forma que las oscilaciones son de muy corta duración. De ahí la ventaja de este tipo de galvanómetros sobre los que llevan un imán móvil: estos últimos, en efecto, pueden oscilar durante mucho tiempo.

Un buen galvanómetro de cuadro móvil detecta una corriente de 10^{-10} amperios.

Amperímetros y voltímetros de cuadro móvil. — El principio de estos aparatos es el mismo que el de los galvanómetros: son, sencillamente, menos sensibles y más sólidos. El cuadro, al que se ha fijado una aguja, está montado sobre ejes, y se desplaza en el entrehierro de un imán curvo. El par de torsión lo proporciona un muelle de espiral de bronce no magnético.

Galvanómetros balísticos. — Hagamos pasar por un galvanómetro cualquiera —de imán o de cuadro móvil— una corriente de muy corta duración; si la inercia de la parte móvil es grande, el aparato no tiene tiempo de desplazarse durante el paso de la corriente, pero sufrirá una impulsión, y cuando la corriente haya cesado, se pondrá a oscilar. Se demuestra que la desviación máxima es proporcional a la cantidad de electricidad transportada por la corriente. Con un galvanómetro, se podrá, pues, medir una cantidad de electricidad transportada por una corriente de corta duración. Un galvanómetro montado de esta forma para medir cantidades de electricidad se llama *balístico*. Repitamos que debe tener una gran inercia.

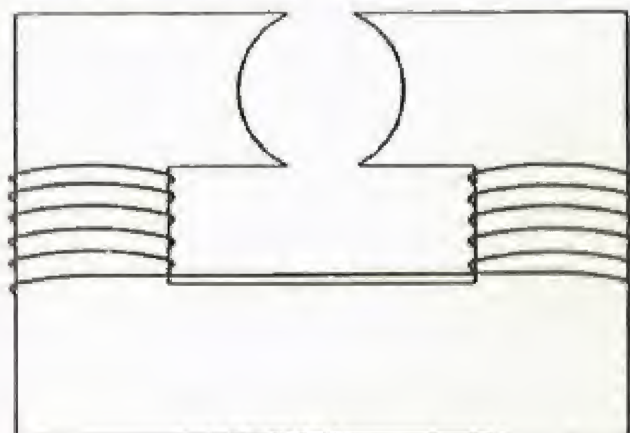
Flúxmetro. — Un flúxmetro es un galvanómetro de cuadro móvil cuyo par de torsión es nulo. Si el circuito al cual está ligado el flúxmetro sufre una variación de flujo $\varphi_1 - \varphi_2$, se produce una corriente inducida, y el cuadro del flúxmetro se desplaza mientras dura esta corriente, deteniéndose después por la acción de las corrientes inducidas en el cuadro. Se demuestra que la desviación del flúxmetro es proporcional a la variación de flujo $\varphi_1 - \varphi_0$.

Dinamos de corriente continua

Dinamos generatrices

Generalidades. — Los aparatos de corriente continua diferentes de las pilas utilizan los fenómenos de inducción. Todos constan de un circuito móvil que se desplaza en un campo magnético: según que este campo esté creado por un imán permanente o un electroimán, se denomina *magneto* o *dinamo*. El principio de su funcionamiento es el mismo en ambos casos. Estudiaremos solamente las dinamos, que son mucho más importantes.

Órganos de una dinamo. — Una dinamo consta de:


Fig. 498

1° Un electroimán, denominado *inductor*, cuya sola particularidad es que su entrehierro es cilíndrico (*fig.* 498).

2° Un circuito móvil, llamado *inducido*, de forma generalmente cilíndrica, que gira en el entrehierro;

3° Los órganos de conexión: el *colector* y las *escobillas*.

El inducido está constituido por bobinas, reunidas todas en serie y arrolladas sobre un anillo (*fig.* 499) o sobre un cilindro de hierro dulce (*fig.* 500), llamado *tambor*.

En las figuras sólo se ha representado un número pequeño de bobinas, que se suponen reducidas a una espira. En realidad, el inducido de una dinamo lleva muchas bobinas formadas por numerosas espiras. El arrollamiento en tambor es el que se adopta más generalmente, pero, para la claridad de las figuras, razonaremos como si el arrollamiento fuese siempre en anillo.

El colector está constituido por un cilindro de materia aislante, *solidario del inducido* y concéntrico con él; en su superficie lleva láminas de cobre dispuestas a lo

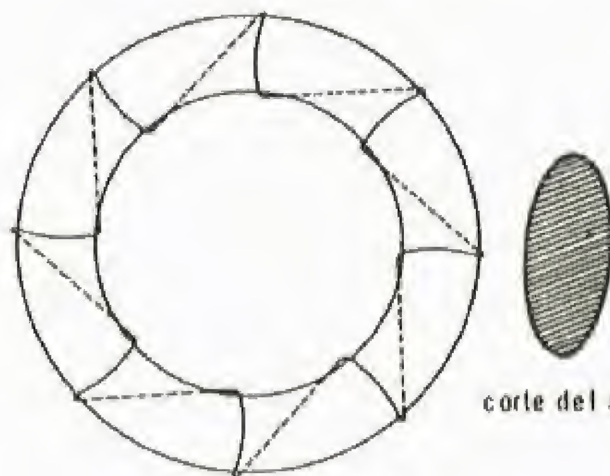
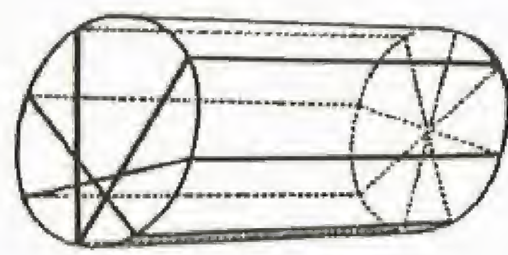


Fig. 499

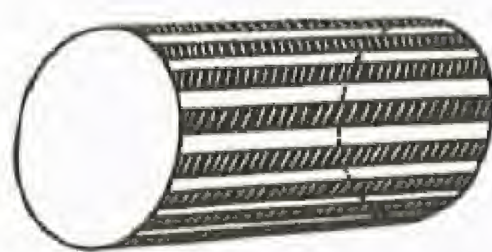

Fig. 500

largo de las generatrices del cilindro (*fig.* 501) y aisladas entre sí. Cada espira del inducido está unida a una lámina del colector (*figura* 502).

Las escobillas son dos piezas de carbón conductor inmóviles con respecto al electroimán (*fig.* 502) y apoyadas sobre dos láminas diametralmente opuestas del colector. Las escobillas están unidas eléctricamente a los polos de la dinamo.

El esquema de la figura 502 indica las relaciones entre los diferentes órganos. También se ha representado una línea de inducción para mostrar cómo estas líneas son canalizadas por el hierro dulce del inducido.

Funcionamiento de la dinamo. — Supongamos que se hace girar el inducido en el sentido de las agujas de un reloj (*fig.* 503). Se observa fácilmente que el flujo de inducción aumenta en las bobinas de los cuadrantes inferior derecho y superior izquierdo (bobinas B_4 y B_8) y disminuye en las bobinas de los otros cuadrantes (B_2 y B_6). La regla del sacacorchos de Maxwell da inmediatamente el sentido de las corrientes inducidas, que están marcadas por flechas. El sentido de la corriente es el mismo en todas las bobinas situadas al mismo lado del plano diametral B_1B_5 normal a las líneas de inducción, y de sentido contrario en dos bobinas situadas a una y otra parte de este plano. En cuanto a la corriente de las bobinas B_1 y B_5, es nula, porque para estas bobinas el flujo es máximo y, por consiguiente, varía poco. Las dos mitades del inducido pueden asimilarse a dos pilas montadas como indica la figura 505, es decir, a dos pilas en derivación.


Fig. 501

Para obtener una corriente en un circuito exterior, basta con reunir sus extremos a las bobinas B_1 y B_5. Esto se consigue, a pesar de la rotación del inducido, gracias al colector y a las escobillas; estas últimas son fijas, como ya se ha dicho, y se apoyan constantemente sobre las láminas del colector situadas en el plano normal a las líneas de inducción (*fig.* 502). Las escobillas son los polos de la dinamo. Como las bobinas son numerosas, y por consiguiente las láminas del colector, la corriente puede considerarse continua.

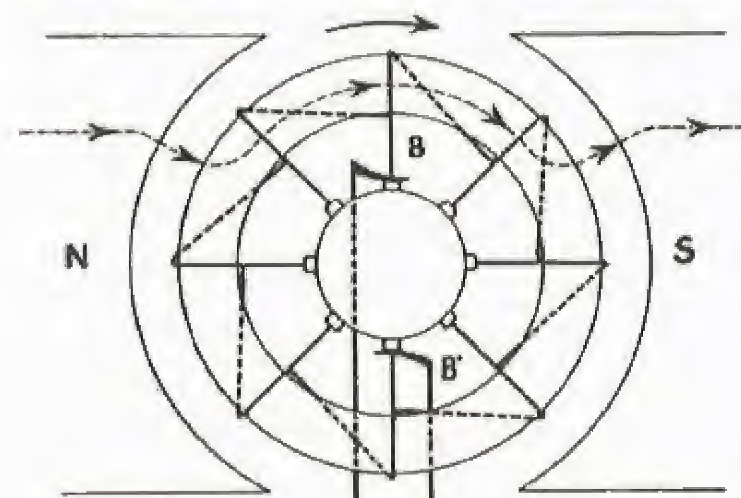


Fig. 502

Fuerza electromotriz de una dinamo. — En el párrafo anterior se ha visto que las dos mitades del inducido constituían dos generadores en derivación (o en paralelo), por lo que la f. e. m. de la dinamo es igual a la f. e. m. de inducción de una mitad del inducido. Para calcularla, multiplicaremos esta f. e. m. producida en una sola espira por la mitad del número total de espiras.

Sea ϕ el flujo de inducción producido por el electroimán; el flujo que atraviesa una espira, por ejemplo la B_1, es $\frac{\phi}{2}$, ya que los tubos de inducción se reparten en partes iguales entre la parte superior y la parte inferior del inducido. Cuando la espira B_1 llega a B_3, el flujo que la atraviesa varía de $\frac{\phi}{2}$ a 0, y si el número de vueltas por segundo es N, esta variación se efectuará en $\frac{1}{4N}$ de segundo. La f. e. m. inducida en una espira será, pues,

$$e = 10^{-8}\,\frac{\frac{\phi}{2}}{\frac{1}{4N}} = 10^{-8}\,2N\phi$$

y la f. e. m. total, E, de la dínamo

$$E = \frac{n}{2} \times e = 10^{-8} \times N \times n \times \phi,$$

en donde n es el número total de espiras. Podrá, pues, decirse que *la f. e. m. de una dinamo es proporcional al número de espiras, a su velocidad de rotación y al flujo de inducción total producido por el inductor.*

Fig. 503

Rendimiento de una dinamo. — Con arreglo a la ley general de inducción, el inducido de una dinamo es recorrido por una corriente de sentido tal que las fuerzas que de ella se derivan se oponen al movimiento que la origina. Habrá, pues, necesidad de efectuar cierto trabajo T para que gire el inducido, o bien habrá necesidad de suministrar una energía W por segundo. Si la energía que produce la dinamo en un segundo en el circuito exterior es W′, se llamará rendimiento de la dinamo la relación

$$R = \frac{W'}{W}.$$

Esta relación es inferior a 1, por haber pérdidas de energía, pérdidas que son debidas:

1° Al efecto Joule en el inducido;

2° Al efecto Joule producido por las corrientes de Foucault en el núcleo del inducido;

3° Al calentamiento por histéresis (v. p. 413) en el núcleo. Éste está sometido, en efecto, a campos variables creados por la corriente del inducido;

4° Al calentamiento por frotamiento de las diferentes piezas mecánicas.

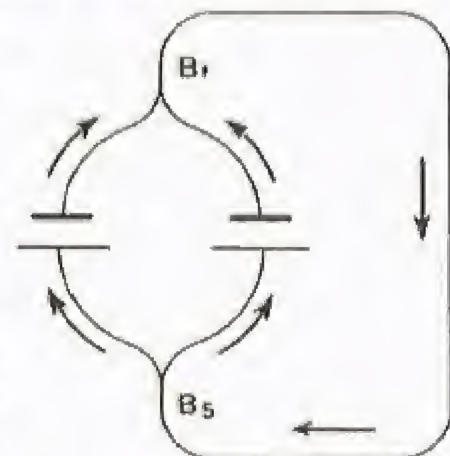
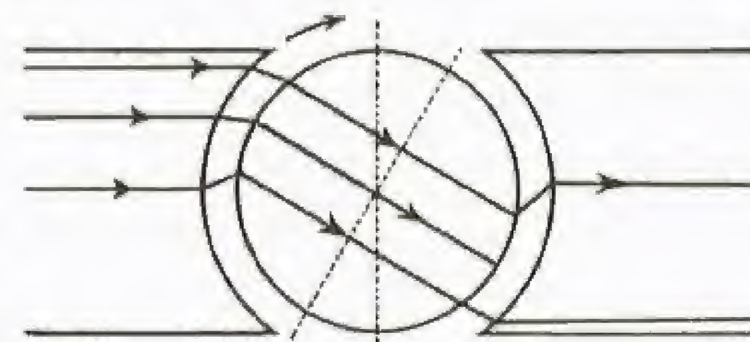


Fig. 504

Una dinamo bien construida debe reducir al mínimo estas pérdidas; esto se consigue dando al inducido una resistencia lo menor posible y formando el núcleo —anillo o tambor— de hojas de chapa delgada aisladas unas de otras, lo que, como muestra el cálculo, disminuye las corrientes de Foucault. Las pérdidas por histéresis se reducen utilizando chapas cuyo ciclo de histéresis sea corto. El rendimiento de una dinamo puede alcanzar entonces 0,85 e incluso 0,95 en las máquinas grandes.

Reacción del inducido. — La corriente que circula por el inducido crea un campo magnético que se compone con el campo inductor de forma que, cuando gira el inducido, las líneas de inducción son como arrastradas por el movimiento (*fig.* 505). Las escobillas, que deben estar siempre reunidas a las espiras situadas en el plano normal a las líneas de inducción, deberán estar desfasadas en el sentido de la rotación. De ello resulta una disminución del flujo máximo que atraviesa una espira y, por consiguiente, una disminución de la f. e. m. de la dinamo, llamada *reacción de inducido*.


Fig. 505

Excitación. — La corriente que pasa por el electroimán de una dinamo se denomina *corriente de excitación*; puede ser producida por una fuente exterior o, más frecuentemente, por la propia dinamo. Se distingue la *excitación en serie, en derivación y compuesta.*

En la excitación en serie, el circuito del electroimán está en serie con el inducido (*fig.* 506). A causa de la imantación remanente, se produce una corriente pequeña en el inducido, corriente que pasa al inductor, aumentando el flujo si el sentido de la corriente es conveniente, y por

consiguiente la f. e. m. La dinamo se ceba. Pero si se invierte el sentido de rotación, el flujo magnético creado por la corriente se opone al flujo remanente y la f. e. m. se anula. Es evidente, además, que si el circuito exterior está abierto la dinamo no se ceba. Por consiguiente:

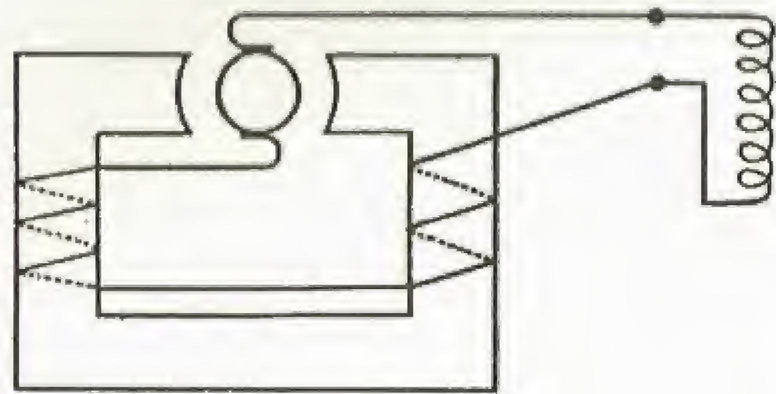


Fig. 506

Una dinamo serie no puede cebarse más que en circuito cerrado y para un sentido de rotación determinado.

En la excitación en derivación, el inductor está en derivación con el inducido (*fig.* 507). En la excitación en serie, la corriente que atraviesa el inductor es la corriente total producida por la dinamo, obteniéndose, por lo tanto, un flujo suficiente con un número pequeño de arrollamientos de hilo; en la excitación en derivación, el inductor es atravesado sólo por una fracción de la corriente total y, por consiguiente, habrá necesidad de gran número de arrollamientos de hilo. Es evidente que:

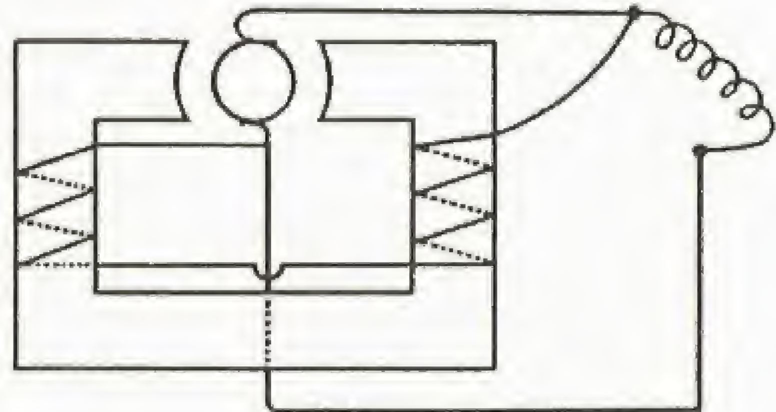


Fig. 507

La dinamo derivación se ceba incluso en circuito abierto, para un sentido de rotación determinado.

Obsérvese que si la resistencia exterior se hace muy pequeña (cortocircuito), la corriente que pasa por el inductor llega a ser nula, la dinamo deja de cebarse y se evita cualquier accidente. Ésta es una de las ventajas de la dinamo derivación sobre la dinamo serie.

La excitación compuesta es una combinación de la excitación en serie y de la excitación en derivación. Una parte del circuito del inductor está en serie, y la otra en derivación. En estas condiciones, la diferencia de potencial en los bornes es prácticamente constante.

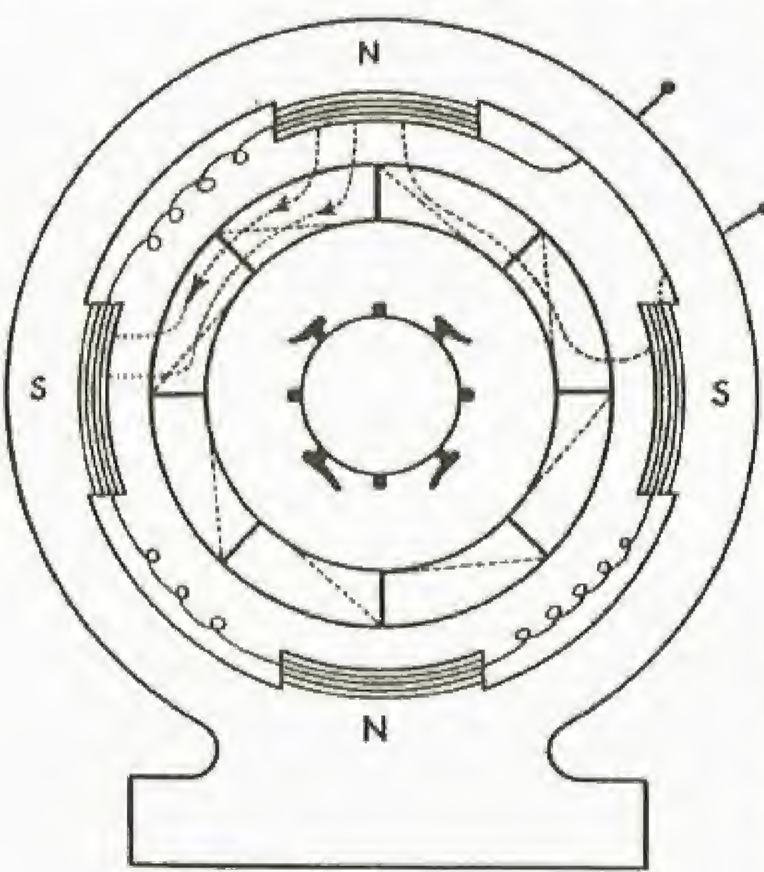


Fig. 508

Dinamos multipolares. — En las grandes máquinas, se multiplica el número de polos del electroimán, pero el principio del funcionamiento de estas *dinamos multipolares* sigue siendo el mismo. Los polos están alternados y en número par (*fig.* 508); hay el mismo número de escobillas que de polos. Las escobillas están insertas en planos diametrales a las líneas de inducción y reunidas de dos en dos.

Dinamos motrices

Motores de corriente continua. — Enviemos al inducido de una dinamo una corriente, a través de las escobillas. ¿Qué ocurrirá? La corriente se divide en dos mitades del inducido y cada espira es recorrida por una corriente. Como está situada en un campo magnético, tiende a desplazarse de manera que el flujo máximo entre por su cara negativa. En la figura 509 se ha marcado el sentido de la corriente y los signos de las caras de las espiras. Se ve fácilmente que las espiras B_2, B_3, B_4 tienden a desplazarse hacia arriba, mientras que las espiras B_6, B_7, B_8 tienden a moverse hacia abajo. El inducido se pondrá, por consiguiente, a girar en el sentido de la flecha de una manera continua, ya que siempre hay espiras que se encuentran en las posiciones B_2, B_3, B_4, B_6, B_7, B_8. Tenemos entonces un motor eléctrico de corriente continua, que no es más que una dinamo. Debe observarse que el sentido de rotación del motor es inverso al sentido en que habría de girar el inducido para obtener con él una corriente del mismo sentido.

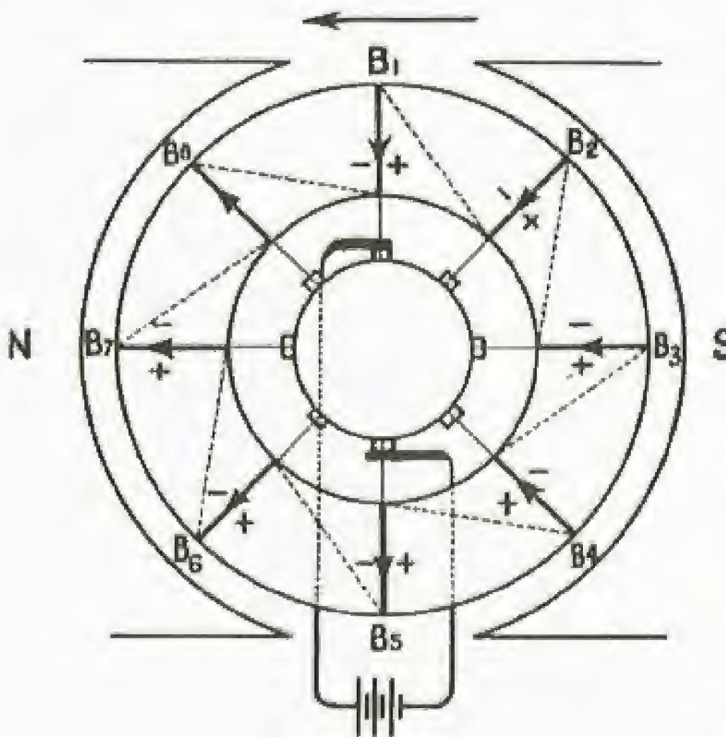


Fig. 509

Fuerza contraelectromotriz y potencia de un motor eléctrico. — La rotación del motor produce en el inducido una corriente de sentido contrario al del que la recorre, es decir, el motor actúa como un generador en oposición; la f. c. e. m. E que posee, es expresada por la fórmula

$$E = 10^{-8}\ Nn\phi.$$

Sea I la intensidad de la corriente; la potencia eléctrica absorbida por el motor será $W = EI + RI^2$. R es la resistencia total del motor, es decir, la del circuito formado por las dos mitades del inducido en derivación y que vale la cuarta parte de la resistencia total del inducido y la del circuito inductor. La energía eléctrica transformada en trabajo es

$$W' = EI,$$

y es la potencia del motor, que también es igual a

$$W' = 10^{-8}\ Nn\phi I \text{ vatios.}$$

Calculemos el par motor Γ en dinas-centímetros. El trabajo de este par en un segundo es

$$\Gamma \cdot 2\pi N \text{ ergios,}$$

que es precisamente la potencia del motor W'. Como

$$W' = 10^{-8}\ Nn\phi I \text{ vatios} = 10^{-1}\ Nn\phi I \text{ ergios/segundo,}$$

se tendrá

$$2\pi N\Gamma = 10^{-1}\ Nn\phi I,$$

o

$$\Gamma = \frac{I}{10} \times n \times \frac{\phi}{2\pi} \text{ dinas-centímetros.}$$

Motor serie. — Como en el caso de las dinamos, la excitación de un motor se efectúa en serie, en derivación o compuesta. Si V es la diferencia de potencial que existe entre las escobillas, E la f. c. e. m. del motor y R su resistencia, se tendrá, en virtud de la ley de Ohm:

$$V = RI + E,$$

de donde

$$E = V - RI;$$

como $E = 10^{-8}\ Nn\phi$, la velocidad de rotación del motor es

$$N = 10^8 \frac{V - RI}{n\phi}.$$

Si la resistencia mecánica que debe vencer el motor es pequeña, el motor gira muy rápidamente para que la f. c. e. m. E pueda equilibrar la diferencia de potencial V; la intensidad I es pequeña, y lo mismo le ocurre a ϕ, siendo entonces N muy grande: el motor se embala. Si, al contrario, la resistencia que tiene que vencer es grande, la velocidad disminuye, como también la f. c. e. m., aumentando la intensidad I y el flujo ϕ; la fórmula muestra entonces que la velocidad del motor disminuye mucho. El inconveniente de los motores en serie es que tienen una velocidad muy variable según el esfuerzo que se les exige, y su ventaja es tener un fuerte par de arranque, ya que al principio la f. c. e. m. E es nula (N = 0) y la intensidad y el flujo son grandes; por consiguiente, se tendrá

$$\Gamma = \frac{1}{10}\ n \times \frac{\phi}{2\pi}.$$

El hecho de que la intensidad que atraviesa el motor es grande en el momento en que se le arranca exige el empleo de un reóstato de arranque, que sólo permite establecer corriente progresivamente (*fig.* 510). Para que varíe la velocidad, se coloca también en derivación sobre el circuito inductor un reóstato, llamado reóstato de campo.

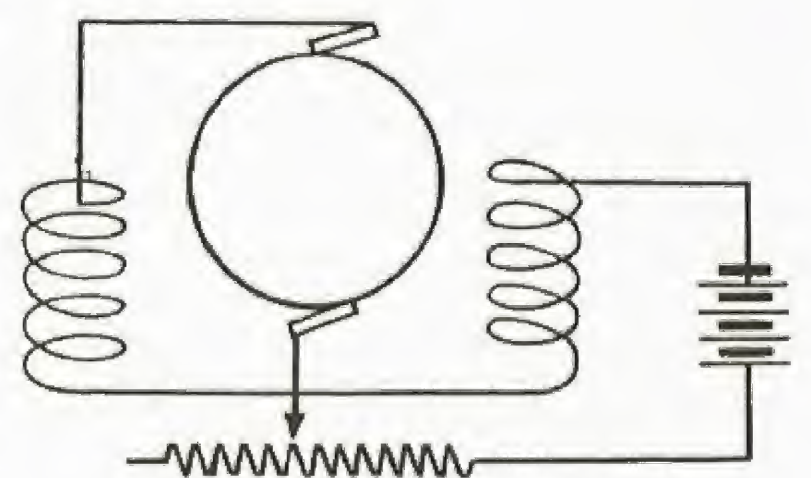


Fig. 510

Motor-shunt. — Se denomina así un motor cuya excitación se hace en derivación (*fig.* 511). En este tipo de motor, la intensidad de la corriente que requiere el inductor es constante, porque la diferencia de potencial en los bornes es siempre la misma V, ya que el flujo ϕ es constante. Únicamente varía la intensidad en el inducido, pero el término RI es pequeño, de forma que la velocidad de rotación es sensiblemente uniforme, cualquiera que sea el esfuerzo que se exija al motor. Estos motores necesitan también un reóstato de arranque D, y en serie con el inductor se coloca un reóstato de campo que permite variar la velocidad.

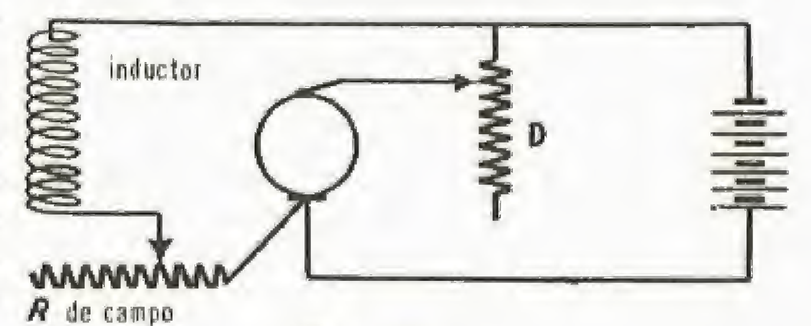


Fig. 511

Motor compuesto. — En los motores de excitación compuesta el circuito inductor colocado en serie lo está de tal forma que determina un campo inverso al que produce el circuito en derivación. De esta

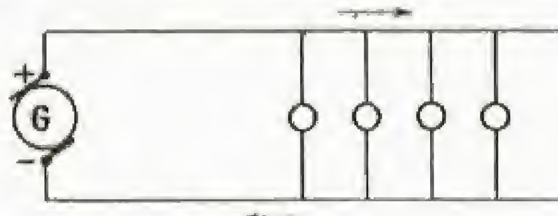
forma, la velocidad de rotación del motor es más constante, ya que si la intensidad I aumenta, el término RI aumenta también, y N debe disminuir, pero a causa del efecto producido por el circuito inductor en serie, ϕ disminuye, lo que produce una compensación.

Rendimiento de los motores. — El rendimiento de un motor se mide por la relación entre la energía mecánica que proporciona W' = EI y la potencia eléctrica que recibe W = VI. Se tendrá, pues,

$$R = \frac{W'}{W} = \frac{E}{V};$$

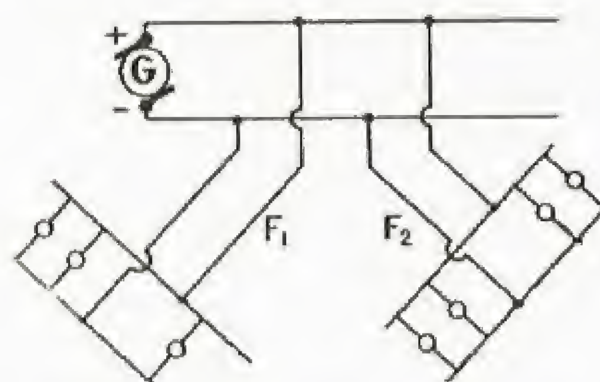
pero, a causa de las corrientes de Foucault y de la histéresis, el rendimiento es de 0,85 a 0,95, o sea algo menor que $\frac{E}{V}$.

Distribución de la corriente continua. — La distribución de la corriente continua por el sector se efectúa a diferencia de potencial constante. De la estación distribuidora de corriente parten dos conductores, y los aparatos de los abonados se montan en derivación sobre esos conductores. Como la intensidad de la corriente depende del número de aparatos conectados a la línea, esta intensidad varía mucho según las horas del día. También suele colocarse con frecuencia en derivación con la dinamo una batería de acumuladores llamada *batería tampón*. Si la intensidad que se exige a la línea es pequeña, la batería se carga, y cuando aumenta esta intensidad, la batería contribuye a su suministro. En las horas de consumo máximo, puede no bastar la batería, y entonces se asocian varias dinamos.

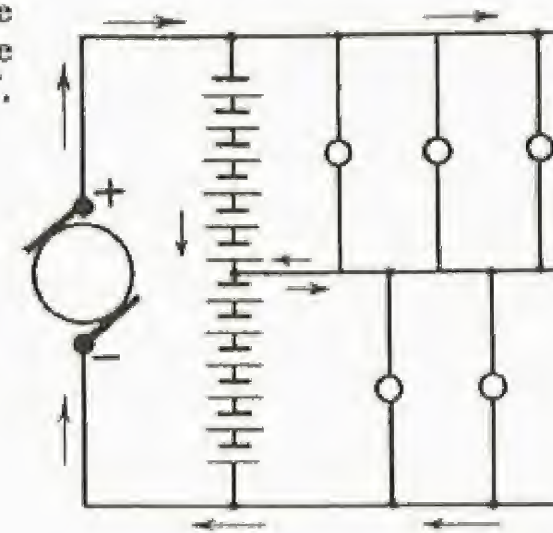


Montaje en derivación

El sistema de alimentación por derivación simple presenta un inconveniente: los abonados situados en la extremidad de la línea disponen de una diferencia de potencial inferior a la de los abonados situados cerca de la fuente, debido a la caída de potencial óhmico a lo largo de la línea. Por esta razón se prefiere la distribución llamada por "*feeders*".



Distribución por «feeders»



Distribución por puentes

También se utiliza la distribución por puentes; puede haber dos puentes (3 hilos), 3 puentes (5 hilos) o todavía más. La batería tampón colocada en derivación con la dinamo tiene por objeto igualar las diferencias de potencial entre los puentes.

Corrientes alternas

Resumen de las definiciones de intensidad de corriente y de fuerza electromotriz. Generadores alternos. Corrientes alternas sinusoidales. — **Efectos producidos por una corriente alterna:** Efectos químicos. Efectos caloríficos. Amperímetros térmicos. Efectos magnéticos. — **Medición de las características de una corriente alterna:** Frecuencia. Intensidad eficaz. Diferencia de potencial eficaz. Fuerza electromotriz eficaz. — **Corrientes producidas en un circuito por una diferencia de potencial alterna:** Intensidad de la corriente en función del tiempo: Circuito sin autoinducción ni condensador intercalado. Circuito con alguna autoinducción y ningún condensador intercalado. Circuito sin autoinducción con resistencia R y una capacidad. Circuito con una autoinducción L, resistencia R y condensador de capacidad C. Potencia media consumida entre dos puntos de un circuito recorrido por una corriente alterna. Medida de la potencia del factor de potencia. Vatímetro. Resolución geométrica de los problemas fundamentales. Resonancia eléctrica

Resumen de las definiciones de intensidad de corriente y de fuerza electromotriz. — Las pilas y los acumuladores son generadores de electricidad, cuya fuerza electromotriz es constante en el tiempo; estos generadores suministran a los conductores unidos a sus polos corrientes "continuas", tales que la cantidad de electricidad que atraviesa el circuito es proporcional al tiempo que tarda en pasar la corriente: $\frac{Q}{t} = C$; esta constante se ha denominado "intensidad de la corriente", y se calcula en amperios cuando la cantidad de electricidad está evaluada en culombios y el tiempo en segundos, haciéndose

$$i = \frac{Q}{t}.$$

Cuando la f. e. m. del generador varía con el tiempo, la cantidad de electricidad que atraviesa el circuito ya no es proporcional al tiempo, sino que es una función más complicada: $Q = f(t)$.

También se define la intensidad "media" de la corriente en un intervalo de tiempo t a $t + \Delta t$, como el cociente $i_m = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ entre la cantidad de electricidad transportada y el tiempo, y la intensidad en un instante dado t, como el límite de la intensidad media cuando Δt tiende hacia cero; es decir, que la intensidad en el instante t es la derivada de la función $f(t)$, por lo que se escribirá $i = f'(t)$, o bien $i = \frac{dQ}{dt}$.

La intensidad de la corriente cambia entonces a cada momento y se dice que la corriente es "variable".

Los generadores de corriente variable son más fáciles de construir que las dinamos de corriente continua; su fuerza electromotriz se obtiene utilizando los fenómenos de inducción. Si, en efecto, se hace variar el flujo de inducción ϕ que atraviesa un circuito, en este circuito se establece, como se sabe, una f. e. m. de inducción, cuyo valor en el instante t es

$$e = \frac{1}{10^8}\frac{d\phi}{dt}\left\{\begin{array}{l}\text{voltios,}\\ \text{maxwells,}\\ \text{segundo.}\end{array}\right.$$

Generadores alternos. — Si se tiene en cuenta que no se puede obtener un funcionamiento indefinido de una máquina cualquiera sin que este funcionamiento sea periódico, es decir, formado por ciclos idénticos, se comprenderá que en todos los generadores de corriente variable la f. e. m. es una función periódica del tiempo; si, además, la f. e. m. del generador cambia periódicamente de sentido, lo mismo ocurrirá con las corrientes llamadas "alternas"; los generadores que las producen se llaman "alternadores".

Toda función periódica puede considerarse como la suma de funciones sinusoidales. La función periódica más sencilla es, por consiguiente, la función sinusoidal, siendo posible construir generadores cuya f. e. m. sea sinusoidal; tal es el caso de los alternadores industriales.

Imaginemos, por ejemplo, que en un campo magnético uniforme se dispone (*fig.* 512) un cuadro rectangular, alrededor del cual se arrolla un hilo, formando N espiras, y hagamos girar este cuadro con un movimiento de rotación uniforme alrededor de un eje ZZ', perpendicular a las líneas de fuerza del campo, a razón de p revoluciones por minuto, es decir, con una velocidad angular $\omega = \frac{2p\pi}{60}$ radianes/s. Sea H el campo magnético y S la superficie de una espira, y supongamos que en el instante inicial la perpendicular al plano de las espiras es perpendicular a las líneas de fuerza; en el instante t, el cuadro habrá girado ωt, y el flujo magnético valdrá

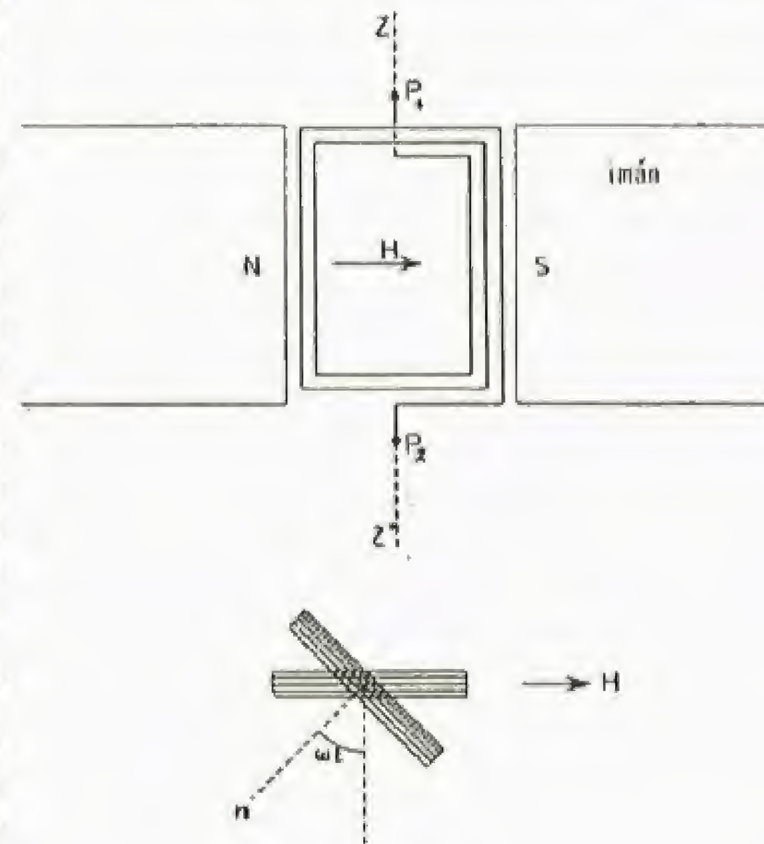


Fig. 512

$$\phi = \text{NSH}\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = -\text{NSH sen }\omega t$$

y la f. e. m. de inducción que aparecerá en los extremos P_1 y P_2 del cuadro será

$$e = -\frac{1}{10^8}\frac{\phi p}{dt} = +\frac{\text{NSH}\omega}{10^8}\cos\omega t;$$

escribamos $E_0 = \frac{\text{NSH}\omega}{10^8}\left\{\begin{array}{l}\text{voltios}\\ \text{centímetros cuadrados}\\ \text{gauss}\end{array}\right.$

y se tendrá $e = E_0 \cos \omega t.$

Si los extremos P_1 y P_2 están unidos por un conductor, este conductor estará recorrido por una corriente alterna sinusoidal de período $T = \frac{2\pi}{\omega}$, de frecuencia $N = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{P}{60}$, la misma de la rotación del cuadro.

Con este dispositivo muy sencillo se produce la transformación de la energía mecánica de rotación del cuadro en energía eléctrica, y se ha realizado un alternador de fuerza electromotriz sinusoidal.

La frecuencia de las corrientes alternas industriales está generalmente comprendida entre 50 y 100; se escoge 50 para la frecuencia de las corrientes destinadas, al menos parcialmente, a la iluminación por incandescencia; esta frecuencia es necesaria para evitar fluctuaciones sensibles de la intensidad luminosa de las lámparas; en las distribuciones reservadas a la fuerza motriz, la frecuencia puede ser más baja: 25, por ejemplo. En la telegrafía sin hilos se utilizan corrientes llamadas "de altas frecuencias", comprendidas entre 50 000 y varios miles de millones.

Corrientes alternas sinusoidales. — La intensidad de una corriente alterna sinusoidal se expresará, pues, por

$$i = I_0 \text{ sen } \omega t = I_0 \text{ sen } 2\pi N t$$

(si la frecuencia es de 50, se tendrá $i = I_0 \text{ sen } 100\ \pi t$); esta corriente queda completamente definida por su período $T = \frac{2\pi}{\omega}$ (o por su frecuencia $N = \frac{1}{T}$) y por su valor máximo I_0. Veremos la forma de determinar estas dos magnitudes.

Se llama *alternancia de la corriente* el tiempo durante el cual la corriente circula en un mismo sentido; el período comprende dos alternancias iguales.

Efectos producidos por una corriente alterna

Ya se han observado diversas acciones producidas por las corrientes continuas: acciones químicas (electrólisis), térmicas (efecto Joule) y magnéticas; vamos ahora a examinar lo que ocurre con las corrientes alternas.

Efectos químicos. — Si se hace pasar una corriente alterna por una cuba electrolítica, los polos se invierten a cada alternancia, apareciendo alternativamente en cada electrodo los cationes y los aniones; en la electrólisis del sulfato de cobre, por ejemplo, las masas de los electrodos permanecen constantes y cada electrodo pierde, en la alternancia en que sirve de ánodo, la masa de cobre que recupera en la alternancia siguiente. En un voltámetro de agua acidulada se recibirá en las probetas que cubren cada electrodo un mismo volumen de gas, formado por hidrógeno y oxígeno.

Se ha utilizado la diferencia de naturaleza de los aniones y los cationes para medir la frecuencia de una corriente alterna.

EXPERIENCIA (*fig.* 513). Sobre una lámina de cobre se coloca una banda de tela embebida por una solución de ferrocianuro de potasio y de nitrato de amonio; uno de los bornes de la corriente alterna se une a la placa de cobre y el otro a una varilla de hierro, que se desplaza sobre la banda de tela por un mango aislador; durante este movimiento se comprueba la formación de un punteado azul sobre la banda de tela. En efecto, durante las alternancias en que la varilla de hierro actúa como ánodo, y sólo durante ellas, el oxígeno desprendido por electrólisis produce óxido férrico, que origina azul de Prusia con el ferrocianuro de potasio.

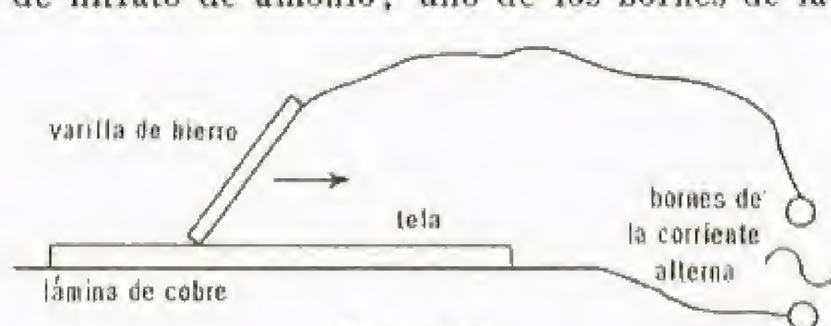


Fig. 513

Para determinar la frecuencia de la corriente, basta contar el número de trazos azules en un recorrido que haya durado un tiempo medido: si se cuentan, por ejemplo, 25 trazos en un recorrido que ha durado medio segundo, la frecuencia de la corriente será de 50.

La cantidad de electrólito que se descompone durante una alternancia se calcula aplicando las leyes de Faraday, a partir de la cantidad de electricidad que pasa en cada alternancia. Esta cantidad es fácil de calcular en el caso de una corriente sinusoidal; si la intensidad de la corriente en un instante t es $i = I_0 \text{ sen } \omega t$, la cantidad de electricidad que pasa entre el instante $t + dt$ es $dq = i \cdot dt$, y es representada (*fig.* 514) por el área del rectángulo $MM'mm'$; la cantidad total transportada durante una alternancia es

Fig. 514

$$q = \int_0^{\frac{T}{2}} i dt;$$

esta cantidad es representada geométricamente por el área comprendida (*fig.* 515) entre un bucle de la sinusoide y el eje de tiempos; tenemos

$$q = \int_0^{\frac{T}{2}} = I_0 \text{ sen } \omega t \cdot dt = \left(- \frac{I_0}{\omega} \cos \omega t \right)_0^{\frac{T}{2}} = \frac{I_0 T}{\pi};$$

puede escribirse $q = \frac{2I_0}{\pi} \cdot \frac{T}{2}$;

y sucede como si durante el tiempo $\frac{T}{2}$ hubiera circulado una corriente continua de intensidad $\frac{2I_0}{\pi}$, sensiblemente $\frac{2}{3}$ I_0: es el "valor medio" de la corriente que corresponde a cada alternancia; la corriente media en la alternancia siguiente tiene el mismo valor, pero es de sentido contrario, de forma que la corriente media correspondiente a un número entero de períodos es nula.

Efectos caloríficos. — El paso de una corriente alterna por un circuito produce un desprendimiento de calor que se utiliza en la iluminación o en la calefacción por incandescencia.

INTENSIDAD EFICAZ. La cantidad de calor que se desprende entre un instante t y el instante inmediato $t + dt$ es, según la ley de Joule: $dQ = \frac{1}{4{,}18} i^2 R dt$, y el calor desprendido durante un período es, por definición, $Q = \int_0^T \frac{1}{4{,}18} i^2 R dt$. Se denomina *intensidad eficaz* de una corriente alterna la intensidad de la corriente continua que produciría, por período, la misma cantidad de calor que la corriente alterna; tenemos, pues,

$$Q = \frac{1}{4{,}18} I^2_{ef} RT,$$

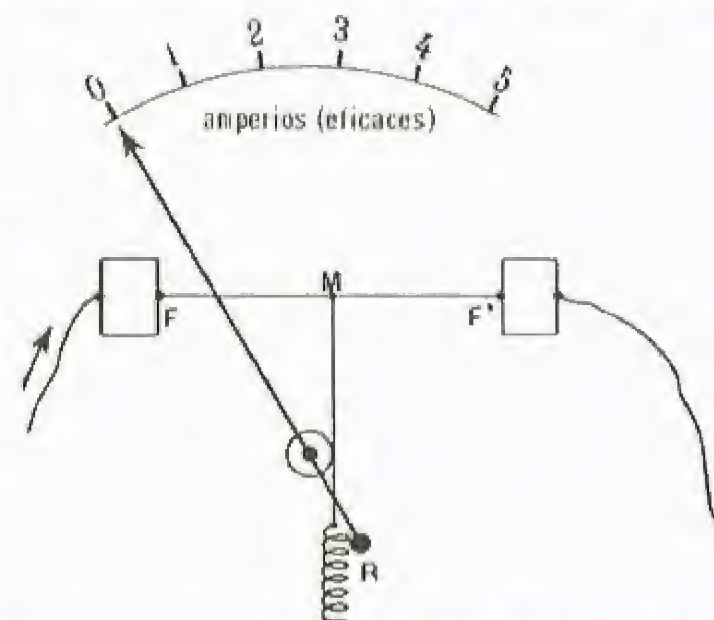
de donde se deduce

$$I^2_{ef} = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt.$$

Si la corriente alterna es sinusoidal, se obtendrá (v. columna anterior): $I_{ef} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$.

Amperímetros térmicos. — En los amperímetros térmicos, el calor producido por la corriente alterna eleva la temperatura de un hilo que se dilata, aprovechándose este alargamiento del hilo para hacer girar una aguja ante un cuadrante; la graduación del cuadrante en amperios está en corriente continua; si el aparato se utiliza con corriente alterna, indica la intensidad eficaz. Cuando la corriente es sinusoidal, la intensidad máxima se deduce de la intensidad eficaz por la relación

$$I_{ef} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}.$$



Amperímetro térmico: el hilo se pone tenso por la acción de un muelle R. El paso de una corriente lo calienta, y su alargamiento provoca el giro de una polea que acciona una aguja ante un cuadrante graduado

Efectos magnéticos. — La intensidad del campo magnético en un punto próximo a un circuito atravesado por una corriente es, como se sabe, proporcional a la intensidad de la corriente, y el sentido del campo magnético depende del sentido de la corriente (regla de Ampère). Una corriente alterna producirá, pues, en cada punto del espacio un campo magnético de magnitud variable y cuyo sentido se invertirá a cada alternancia de la corriente.

Análogamente, la fuerza electromagnética producida por un campo magnético en un elemento de circuito cambia de sentido con la corriente que lo atraviesa. Como consecuencia, la aguja de un galvanómetro de imán móvil o el cuadro de un galvanómetro de cuadro sufrirá, a cada alternancia, impulsiones de sentido contrario; si el período propio de las oscilaciones del imán o del cuadro es largo con respecto al de la corriente —lo que es el caso general—, la pieza móvil no podrá seguir y el aparato no facilitará indicación alguna; si el período propio es muy corto, la pieza móvil podrá seguir las oscilaciones de la corriente. Tales galvanómetros, de poca inercia, se llaman *oscilógrafos*.

Medición de las características de una corriente alterna

Frecuencia. — Para determinar la frecuencia de una corriente alterna puede utilizarse un oscilógrafo: en el espejo del oscilógrafo aparece una mancha luminosa que se recibe sobre un cilindro registrador, envuelto en una película fotográfica, que gira alrededor de un eje paralelo a los desplazamientos de la mancha (horizontal, por ejemplo, si el espejo del galvanómetro gira alrededor de un eje vertical). Sobre la película se obtiene una sinusoide, y para determinar la frecuencia de la corriente, bastará contar el número de oscilaciones sobre una longitud determinada, que corresponde a un tiempo conocido cuando se conoce la velocidad de rotación del cilindro.

Intensidad eficaz. — Indiquemos únicamente que también puede medirse el valor de la intensidad eficaz de una corriente alterna por medio de aparatos llamados "electromagnéticos", en los cuales se somete un equipo móvil a una fuerza o a un par que sólo depende del cuadrado de la intensidad de la corriente; si el período de las oscilaciones del equipo es grande con respecto al de la corriente, como suele ser el caso, el equipo adopta una posición de equilibrio que corresponde al valor medio de la fuerza, es decir, al valor medio del cuadrado de la intensidad de la corriente.

Diferencia de potencial eficaz. — Si entre dos puntos A y B de un circuito se coloca en derivación un amperímetro térmico, de fuerte resistencia con respecto a la de la parte AB, la indicación que facilita es proporcional al valor medio del cuadrado de la diferencia de potencial entre los puntos A y B, es decir, al valor eficaz de esta diferencia de potencial. El aparato así utilizado es un voltímetro.

Si R es la resistencia del aparato, la intensidad instantánea de la corriente que la atraviesa es, en virtud de la ley de Ohm, $i = \frac{v}{R}$, y la cantidad de calor desprendida, en promedio, al cabo de un tiempo t de paso de la corriente, es

$$Q = \frac{1}{4{,}18}\,\frac{1}{t}\int_0^t i^2 R\,dt = \frac{1}{4{,}18}\cdot\frac{1}{t}\int_0^t \frac{v^2}{R^2} R\,dt = \frac{1}{4{,}18}\cdot\frac{1}{R} V^2_{ef};$$

el aparato está graduado en voltios en corriente continua.

Fuerza electromotriz eficaz. — Disponiendo entre los polos de un generador de corriente alterna un voltímetro de fuerte resistencia con respecto a la del alternador, se medirá la f. e. m. eficaz. Si el generador tiene una f. e. m. sinusoidal, se tendrá la relación $E_{ef} = \frac{E_0}{\sqrt{2}}$.

Corrientes producidas en un circuito por una diferencia de potencial alterna

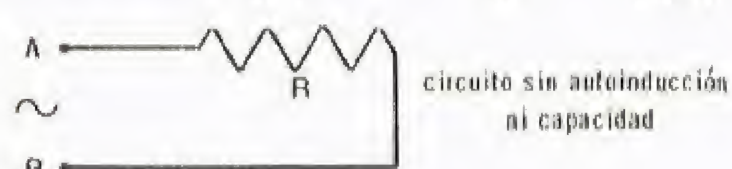
Se ha indicado hasta ahora cómo es posible obtener generadores cuya f. e. m. es alterna, y, en particular, sinusoidal, habiéndose también estudiado las propiedades de una corriente alterna. Queda por indicar la relación que existe entre la intensidad de la corriente producida y la f. e. m. del generador para un circuito dado. Se calculará después la potencia media consumida entre dos puntos de un circuito recorrido por una corriente alterna, limitándonos al caso en que la f. e. m. es sinusoidal.

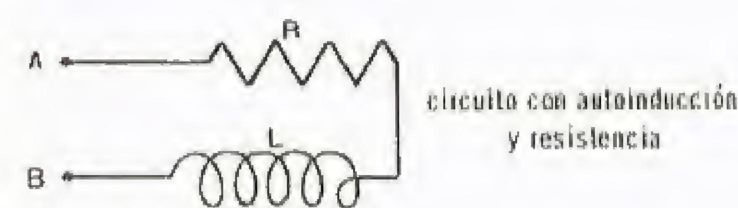
Intensidad de la corriente en función del tiempo. — A los extremos A y B de un circuito, se aplica una diferencia de potencial alterna sinusoidal $v = V_0 \cos \omega t$. Hallar la expresión de la intensidad de la corriente en función del tiempo.

1º **Circuito** (*fig.* 515 [1]) **sin autoinducción ni condensador intercalado.**

Este caso se presenta, por ejemplo, cuando se conecta una lámpara de incandescencia a una toma de corriente alterna. En este caso se aplica en cada instante la ley de Ohm y se tendrá $i = \frac{v}{R}$, o $i = \frac{1}{R} V_0 \cos \omega t$ (R = resistencia del circuito AMB); por otra parte, se tendrá, por definición,

$$I^2_{ef} = \frac{1}{T}\int_0^T i^2\,dt = \frac{1}{R^2}\cdot\frac{1}{T}\int_0^T v^2 dt, \text{ es decir: } I_{ef} = \frac{1}{R} v_{ef}.$$





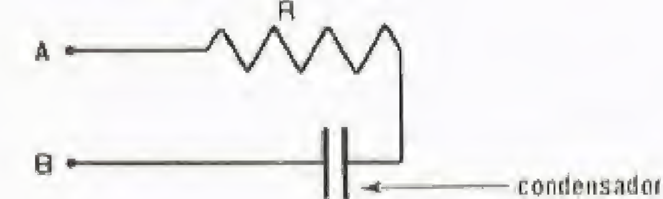


Fig. 515

Por consiguiente, cuando el circuito no contiene más que resistencias puras, la intensidad de la corriente es sinusoidal, en fase con la diferencia de potencial; la intensidad eficaz se deduce de la tensión eficaz aplicando la ley de Ohm.

Más adelante se verá que la potencia media consumida tiene como expresión $W = I_{ef} \cdot V_{ef}$, fórmula análoga a la de la corriente continua, con la única diferencia de substituir la intensidad y la diferencia de potencial por sus valores eficaces.

2º **Circuito con alguna autoinducción y ningún condensador intercalado** (*fig.* 515 [2]).

La autoinducción de un circuito está definida por su coeficiente de autoinducción L, que se calcula en henrios. Cualquier variación de la intensidad de corriente en un circuito con autoinducción se manifiesta por la aparición de una fuerza electromotriz de autoinducción expresada por la relación $e = -L\frac{di}{dt}$ (voltios, henrios, amperios, segundos); esta f. e. m. se suma algebraicamente con la diferencia de potencial; al aplicarse la ley de Ohm generalizada, se tendrá

$$v - L\frac{di}{dt} = Ri, \quad \text{o} \quad (1) \quad L\frac{di}{dt} + Ri = V_0 \cos \omega t;$$

la intensidad de la corriente es una función del tiempo que satisface esta relación; puede verificarse que i es de la forma $i = I_0 \cos(\omega t - \varphi)$; en efecto, se tiene $i = I_0 (\cos \varphi \cos \omega t + \operatorname{sen} \varphi \operatorname{sen} \omega t)$.

$$\frac{di}{dt} = I_0 (\omega \operatorname{sen} \varphi \cos \omega t - \omega \cos \varphi \operatorname{sen} \omega t),$$

de donde

$$L\frac{di}{dt} + Ri = I_0 (L\,\omega \operatorname{sen} \varphi + R \cos \varphi) \cos \omega t +$$
$$+ I_0 (R \operatorname{sen} \varphi - L\,\omega \cos \varphi) \operatorname{sen} \omega t.$$

Demostraremos que puede escogerse I_0 y φ de forma que esta cantidad puede identificarse con $V_0 \cos \omega t$; para ello basta con que

$$R \operatorname{sen} \varphi - L\,\omega \cos \varphi = 0, \quad \text{es decir:} \quad (2) \quad tg\varphi = \frac{L\omega}{R}$$

$$I_0(L\omega \operatorname{sen} \varphi + R \cos \varphi) = V_0,$$

lo que, teniendo en cuenta (2), dará

$$I_0 = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}},$$

o bien, puesto que

$$I_{ef} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \quad \text{y} \quad V_{ef} = \frac{V_0}{\sqrt{2}}$$

$$(3) \qquad I_{ef} = \frac{V_{ef}}{\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}};$$

la cantidad $Z = \sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$ se llama "impedancia" del circuito, y la relación (3) puede escribirse

$$I_{ef} = \frac{V_{ef}}{Z}.$$

En resumen, cuando el circuito tiene autoinducción, la intensidad de la corriente es función sinusoidal del tiempo, pero presenta con respecto a la diferencia de potencial un retraso de fase tal que $tg\,\varphi = \frac{L\omega}{R}$ o $\cos \varphi = \frac{R}{Z}$; la resistencia R se substituye por la impedancia $Z = \sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$, y se tendrá $I_{ef}\ \frac{V_{ef}}{Z}$, y por consiguiente, $i = \frac{V_0}{Z} \cos(\omega t - \varphi)$.

La impedancia es tanto mayor cuanto mayor es la autoinducción y la frecuencia, puesto que $\omega = 2\,\pi\,N$, es mayor.

Ejemplo. Sea una bobina de 10 cm de diámetro, 20 cm de longitud y 1 000 espiras. El campo magnético que produce una corriente de intensidad i en el interior de la bobina que atraviesa es:

$$H = \frac{4\pi n i}{10} \begin{cases} \text{gaus} \\ \text{amperios; el flujo es} \end{cases}$$

$$\phi = \frac{4\pi n i}{10} \times nlS \begin{cases} \text{maxwells,} \\ n\text{, número de arrollamientos de hilo por centímetro.} \\ l\text{, longitud en cm,} \\ \text{S, superficie de una espira en cm}^2; \end{cases}$$

la f. e. m. de inducción es $e = -\frac{1}{10^8}\frac{d\phi}{dt}$ voltios; por lo que se tendrá $L = \frac{1}{10^8}\,\frac{4\pi n}{10}\,nlS$, o sea, sensiblemente, L = 0,5 henrios; la resistencia de tal bobina depende de la resistividad y del diámetro del hilo empleado para el bobinado, del orden de 1 ohm; para una corriente de frecuencia 50 se obtiene Z = 157 ohmios; para una frecuencia de 5 000, la impedancia llega a ser Z = 15 700 ohmios, mucho mayor que la resistencia.

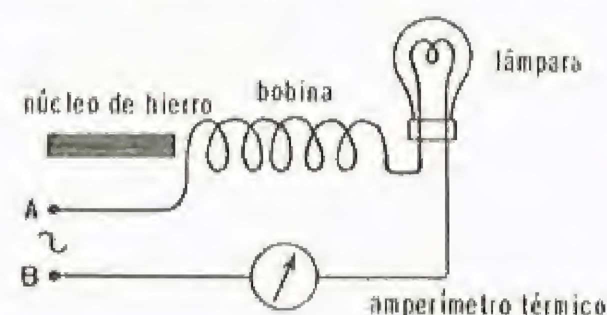


Fig. 516

EXPERIENCIA. Sobre los bornes A y C de una distribución de 110 voltios eficaces de corriente alterna se conecta una lámpara y una bobina (*fig.* 516); se comprueba que colocando un núcleo de hierro dentro de la bobina, el brillo de la lámpara disminuye considerablemente y, por lo tanto, la intensidad de la corriente, como puede también comprobarse interponiendo un amperímetro térmico en el circuito.

3º **Circuito sin autoinducción, con resistencia R y una capacidad** (*fig.* 515 [3]). Muestra la experiencia que el circuito es atravesado por una corriente. Sea $v = V_0 \cos \omega t$ la tensión que se aplica entre los puntos A y B, v_1 la diferencia de potencial, en el instante t, entre las armaduras del condensador, e i la intensidad de la corriente. Se tendrá

$$(1) \qquad v = v_1 + Ri.$$

Si q es la carga del condensador en el instante t, y C su capacidad, se tendrá

(2) $$q = Cv_1;$$

además: $$i = \frac{dq}{dt} = C\frac{dv_1}{dt}.$$

Derivando los dos miembros de la ecuación (1) con respecto a t se tendrá

$$-\omega V_0 \operatorname{sen} \omega t = \frac{i}{C} + R\frac{di}{dt},$$

o (3) $$R\frac{di}{dt} + \frac{i}{C} + \omega V_0 \operatorname{sen} \omega t = 0.$$

Se comprueba fácilmente, mediante un cálculo análogo al efectuado en el caso de un circuito con autoinducción, que la solución de esta ecuación es

$$i = I_0 \cos(\omega t + \varphi)$$

con $$I_0 = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{C^2\omega^2}}} \quad \text{o} \quad I_{ef} = \frac{V_{ef}}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{C^2\omega^2}}},$$

y $\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{RC\omega}$; y la expresión de la corriente en el instante t será, $$i = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{C^2\omega^2}}}$$

Como en el problema anterior, se denomina "impedancia" la cantidad $Z = \sqrt{R^2 + \frac{1}{C^2\omega^2}}$; se ve que la impedancia del circuito disminuye cuando aumentan la capacidad del condensador y la frecuencia de la corriente.

EJEMPLO. *Calcular la intensidad de la corriente que atraviesa un condensador de un microfaradio, cuyas armaduras están conectadas a los bornes de una toma de corriente alterna de 110 voltios a 50 períodos.*

Como la resistencia se supone despreciable, se tendrá

$$I_{ef} = V_{ef} \times C\omega,$$

es decir: $I_{ef} = 110 \times 10^{-6} \times 100\pi = 11\pi\ 10^{-3}$ amperios,

o sea $$I_{ef} = 34{,}1 \text{ miliamperios};$$

la intensidad de la corriente vendrá expresada por

$$i = 11\pi \cdot 10^{-3} \times \sqrt{2} \operatorname{sen} 100\pi\, t,$$

o sea, sensiblemente: $i = 47{,}7 \operatorname{sen} 100\pi t$ miliamperios.

La corriente y la tensión aplicada están en cuadratura, puesto que $\cos\varphi = 0$, $\varphi = \frac{\pi}{2}$.

4º **Circuito con autoinducción L, resistencia R y condensador de capacidad C.**

Se tendrá

(1) $$v - L\frac{di}{dt} = v_1 + Ri.$$

(2) $$q = Cv_1, \text{ de donde } i = \frac{dq}{dt} = C\frac{dv_1}{dt},$$

de donde, derivando la ecuación (1):

$$L\frac{d^2i}{dt^2} + R\frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = -\omega V_0 \operatorname{sen} \omega t.$$

Esta ecuación admite como solución:

$$i = I_0 \cos(\omega t - \varphi),$$

siendo

$$I_0 = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}}, \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{L\omega - \frac{1}{\omega C}}{R},$$

o

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z}, \quad \text{siendo } Z = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}.$$

La cantidad Z es la impedancia.

Esta fórmula general proporciona los resultados obtenidos anteriormente si en ellos se anula L y se hace C infinito (suprimir un condensador equivale a poner un condensador de capacidad infinitamente grande).

Potencia media consumida entre dos puntos de un circuito recorrido por una corriente alterna. — Sean i e $i + di$ las intensidades de la corriente en los instantes t y $t + dt$, y v y $v + dv$ las diferencias de potencial; la energía dW consumida durante el tiempo dt estará, pues, comprendida entre $i.v.dt$ y $(i + di)(v + dv) \cdot dt = i.v.dt + v.di.dt + i.dv.dt$; se tendrá, por tanto: $dW = i.v.dt$, con un error de unos pocos infinitésimos de orden superior.

La energía suministrada por período será $W = \int_0^T i.v.dt$ y la potencia media $P = \frac{1}{T}\int_0^T i.v.dt.$

Por otra parte, se tendrá

$$v = V_0 \cos \omega t \text{ e } i = I_0 \cos(\omega t - \varphi), \text{ y}$$

la potencia media será: $$P = \frac{I_0V_0}{T}\int_0^T \cos\omega t \cos(\omega t - \varphi)\, dt;$$

esta integral se obtiene reemplazando el producto de cosenos por una suma, obteniéndose

$$P = \frac{I_0V_0}{2}\cos\varphi, \quad \text{o} \quad P = I_{ef} \cdot V_{ef} \cdot \cos\varphi;$$

el término $\cos\varphi$ se llama "factor de potencia", y es igual a la unidad en un circuito sin self ni capacidad; en un circuito sin resistencia es nulo.

Medida de la potencia del factor de potencia. Vatímetro. — La medida de la potencia consumida entre dos puntos de un circuito recorrido por una corriente alterna se efectúa por medio de un aparato llamado *vatímetro.*

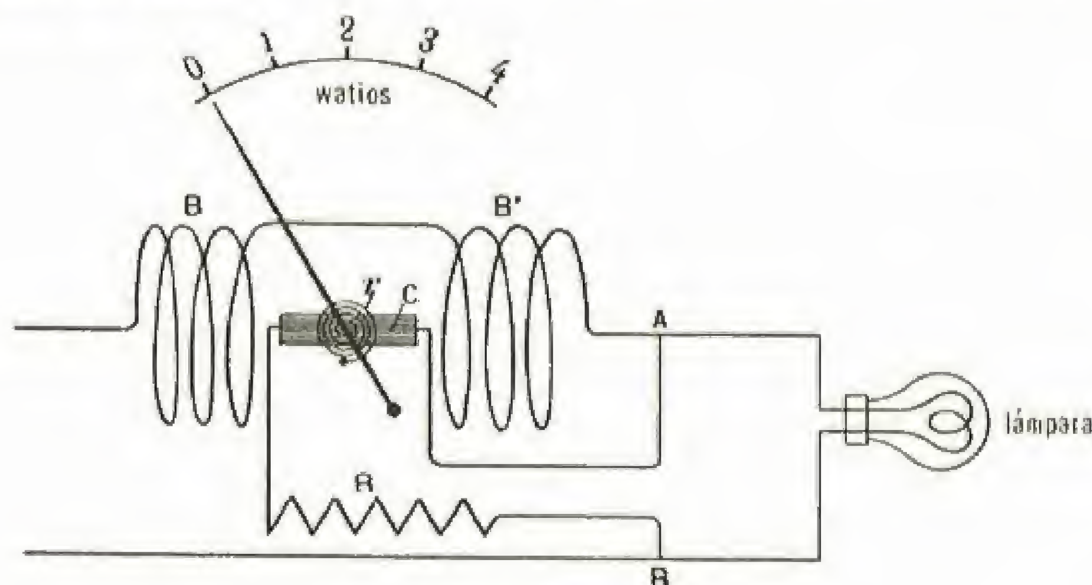


Fig. 517

Los vatímetros llevan dos bobinas B y B' (*fig.* 517) por las que se hace pasar la corriente alterna; esta corriente crea un campo magnético cuya intensidad es proporcional a la intensidad instantánea de la corriente i. En el campo de las bobinas se dispone un cuadro móvil C, en serie con una gran resistencia R; el cuadro y la resistencia se colocan en derivación sobre las extremidades A y B de la parte del circuito en la cual quiere medirse la potencia consumida. La corriente i' que pasa por el cuadro es proporcional a la diferencia de potencial $V_A - V_B$, como un voltímetro; sobre el cuadro actuará, pues, un par eléctrico proporcional a ii', es decir, a $i\,(V_A - V_B)$, cuyo par medio es proporcional a la potencia. Este par está equilibrado por el par de torsión de un muelle r; la graduación se hace en corriente continua y se establece directamente en vatios.

Si se mide además la intensidad eficaz y la tensión eficaz, la medida de la potencia $P = I_{ef} \cdot V_{ef} \cdot \cos\varphi$ permite determinar el factor potencia $\cos\varphi$.

Resolución geométrica de los problemas fundamentales. — Sea la intensidad de la corriente producida por una diferencia de potencial alterna $v = V_0 \cos \omega t$ en un circuito de resistencia R y de autoinducción L lo que se quiere determinar; admitamos que la intensidad de la corriente tenga la forma

$$i = I_0 \cos(\omega t - \varphi);$$

se tendrá la relación

$$v - L\frac{di}{dt} = Ri, \quad \text{o} \quad v = L\frac{di}{dt} + Ri,$$

es decir, que v es la suma de dos funciones sinusoidales del mismo período $T = \frac{2\pi}{\omega}$; hagamos corresponder a la función Ri un vector de longitud RI_0 que gira con la velocidad angular ω; la función $L\frac{di}{dt}$ estará representada por un vector $L\omega I_0$, en avance de fase de $\frac{\pi}{2}$ con respecto a la corriente Ri (la derivada de una función periódica tiene un avance de $\frac{\pi}{2}$ con respecto a esta función), y la función v estará entonces representada por el vector que se obtiene tomando la resultante geométrica de los dos primeros (construcción de Fresnel). En el triángulo rectángulo ABC se tiene

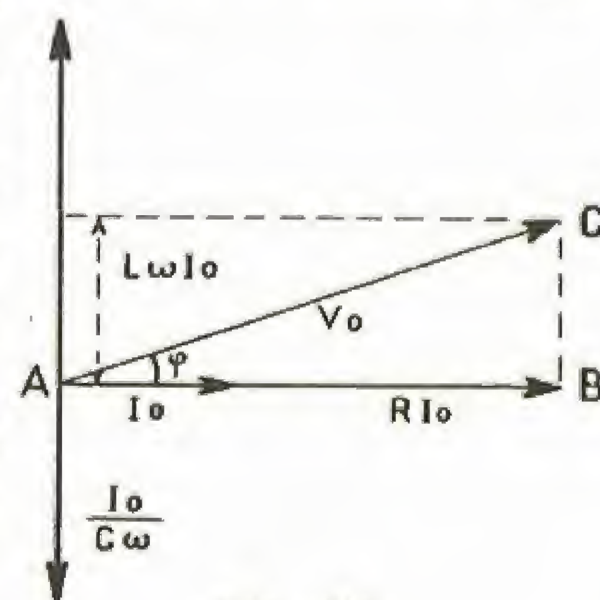


Fig. 518

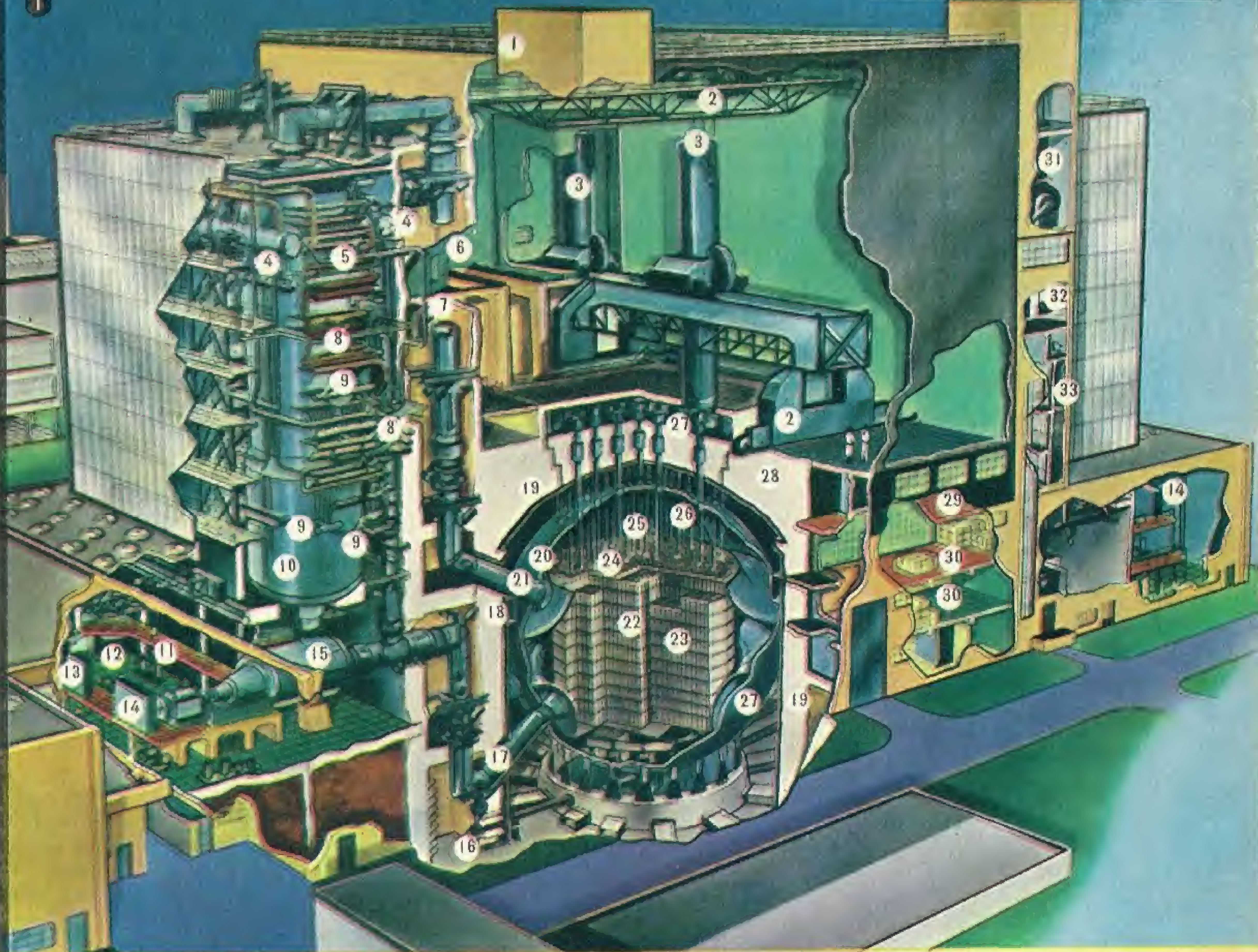
$$V_0^2 = R^2I_0^2 + L^2\omega^2I_0^2,$$

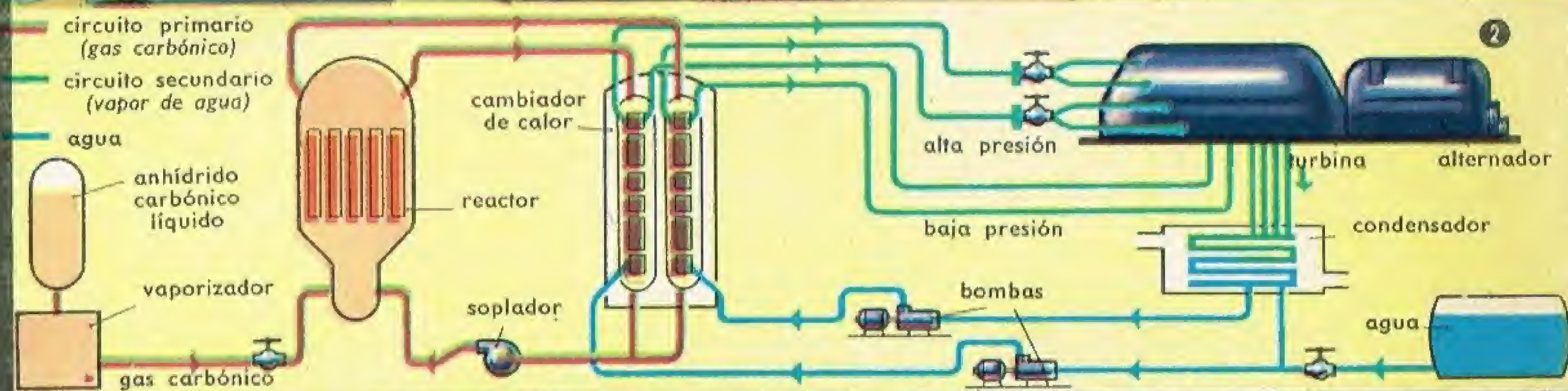
de donde

$$I_0 = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}},$$

CENTRAL DE BRADWELL
(Gran Bretaña)
Principales detalles
del reactor nº 1

1. Ventilación del reactor
2. Puentes movedizos
3. Máquinas para cargar o descargar las barras
4. Calderas de baja y alta presión
5. Recalentadores de baja y alta presión
6. Sala de mandos del reactor
7. Tubo de aeración por aspiración
8. Evaporadores de alta y baja presión
9. Aparatos economizadores de alta y baja presión
10. Cambiadores de calor (6 por reactor)
11. Bombas de las calderas alta y baja presión
12. Depósitos de combustibles para el soplador
13. Mandos de las bombas de las calderas
14. Mandos del soplador y de las calderas
15. Soplador para el gas carbónico
16. Canal de acceso del reactor
17. Entrada del gas carbónico
18. Orificio anular de aeración
19. Pantalla térmica
20. Ladrillos del reflector
21. Salida del gas carbónico
22. Elementos combustibles
23. Ladrillos del moderador
24. Canales para la carga del reactor
25. Barras de control
26. Tubos de carga
27. Loza amovible
28. Pantalla biológica
29. Preparación del combustible
30. Reservas de combustible
31. Soplador para la refrigeración de la pantalla protectora
32. Filtros del refrigerante de la pantalla protectora
33. Ascensor
34. Sala de los turboalternadores

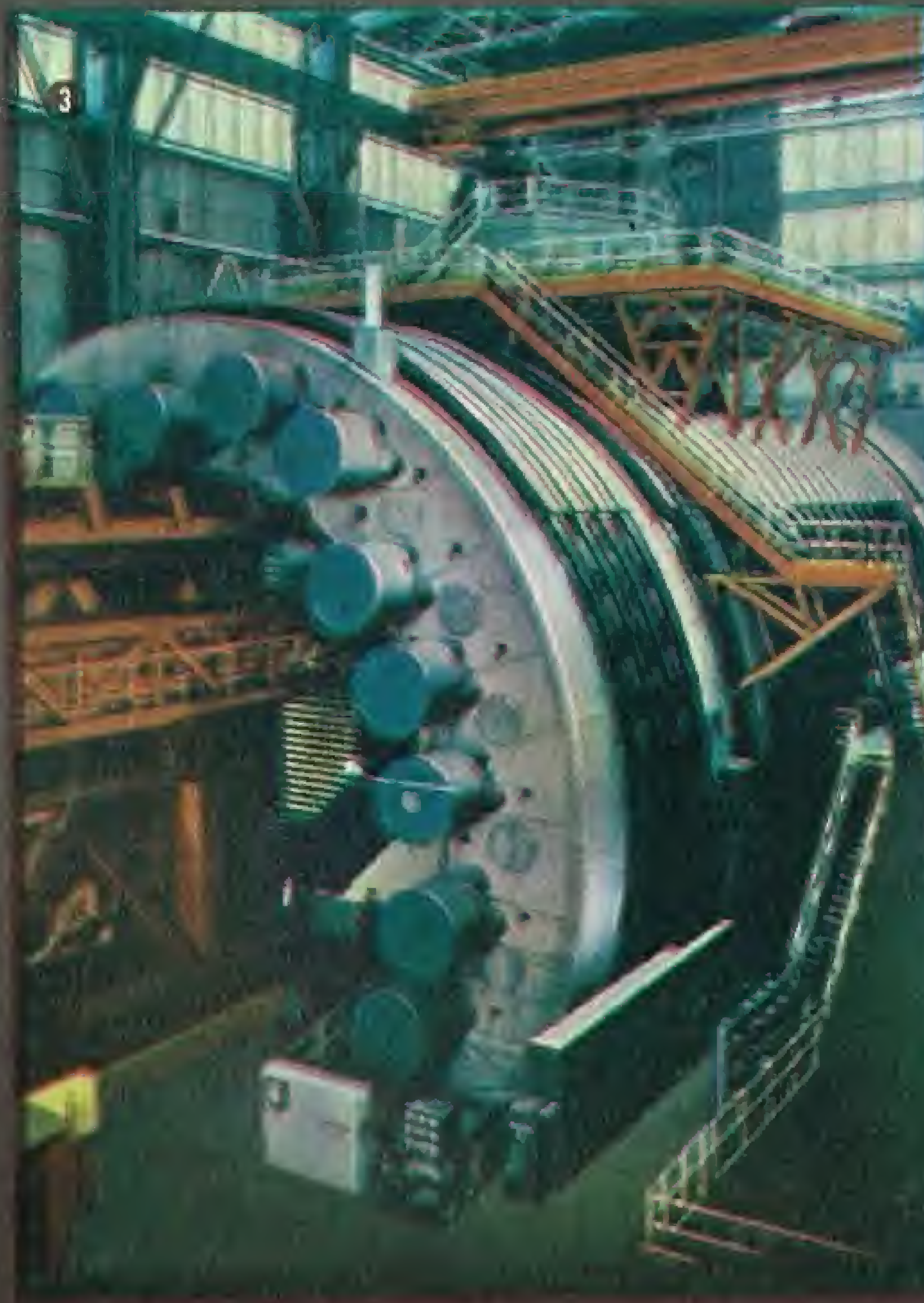




2. Esquema que muestra el funcionamiento de una central con reactor refrigerado por gas carbónico. En su circuito cerrado, a una presión de 25 kg/cm², el gas carbónico entra en el reactor a una temperatura de 140 °C y sale de él a una temperatura de 350 °C. El rendimiento por hora es de unas 5 000 t.

3. Reactor de potencia G-2 (Marcoule, Francia). Las dimensiones del reactor y la presión que reina en él justifican la realización de una armadura de acero de poco espesor. La presión es soportada por la pantalla de protección biológica, a base de hormigón pretensado.

4. Central nuclear de Calder Hall (G. B.) [vista parcial].





Phot. U. K. A. E. A., C. E. A. según « Nuclear Power »

CENTRAL TÉRMICA

Ventiladores acoplados, insuflación de aire de tiro y évacuación del humo.

Caldera y tubería de vapor.

Sala de mandos y de control de todos los aparatos necesarios a la marcha de una sección de la central.

El carbón en polvo llega a un mechero de encendido alimentado con mazut.

Almacenamiento de las cenizas volantes que, recuperadas por los desempolvadores, se utilizaran en las fábricas de cemento.

Turbo alternador, turbina de alta, media y baja presión y alternador refrigerado por hidrógeno a presión.

depósito

Estación elevadora, depuradora y de cloración del agua de refrigeración.

aire

silo

humo

mazut

puesto de desmineralización total

compresor

bomba

condensor

ESQUEMA DE UNO DE LOS ELEMENTOS INDEPENDIENTES DE UNA CENTRAL TÉRMICA.

bomba

evacuación de cenizas

Un transbordador lleva el carbón desde la carbonera hacia los silos de mezcla.

Alambique que provee agua destilada necesaria a la alimentación de la caldera.

Trituradores: el aire caliente a presión seca y transporta el carbón pulverizado hasta los ventiladores.

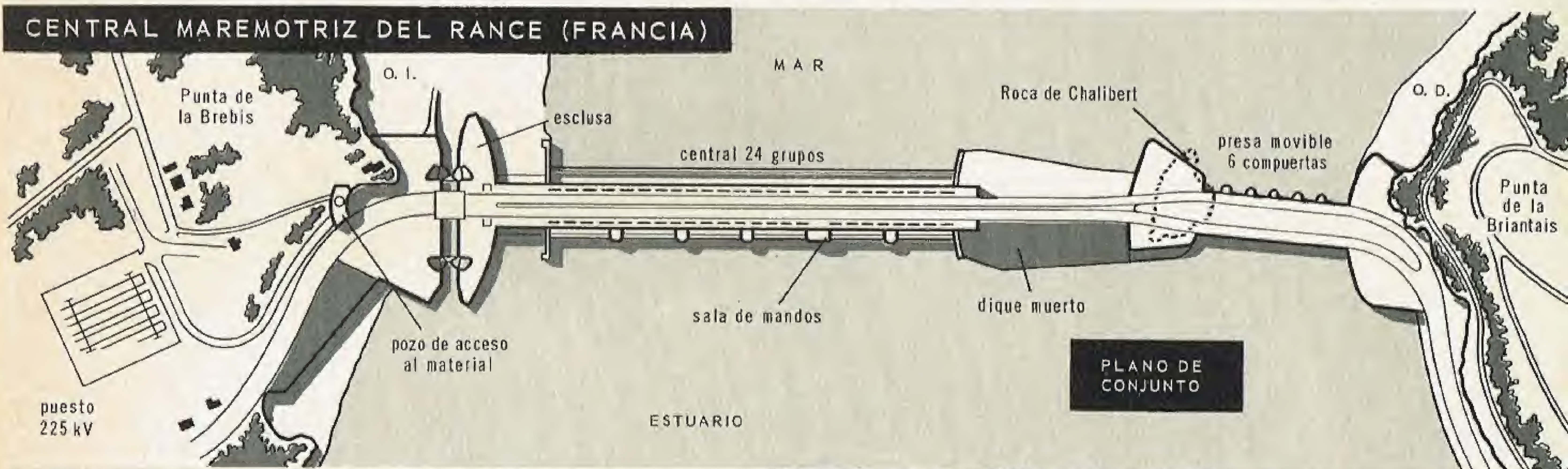
Transformador trifásico que eleva la tensión del alternador con salida de la línea hacia la interconexión

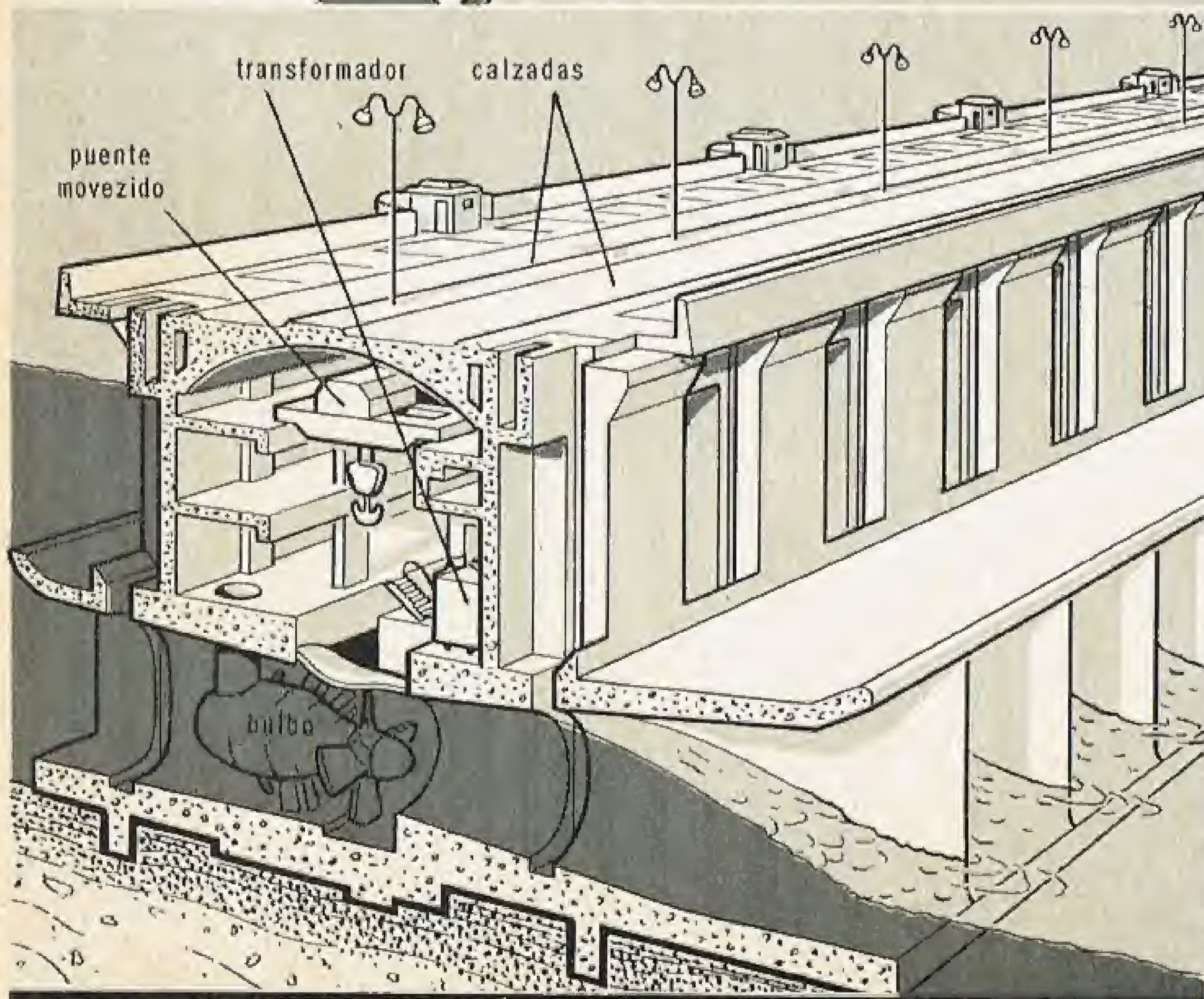
Torre de mando y edificio de los cuatro silos destinados a la realización de la mezcla.

Plataformas vibrantes situadas al pie de los silos que alimentan los trituradores.

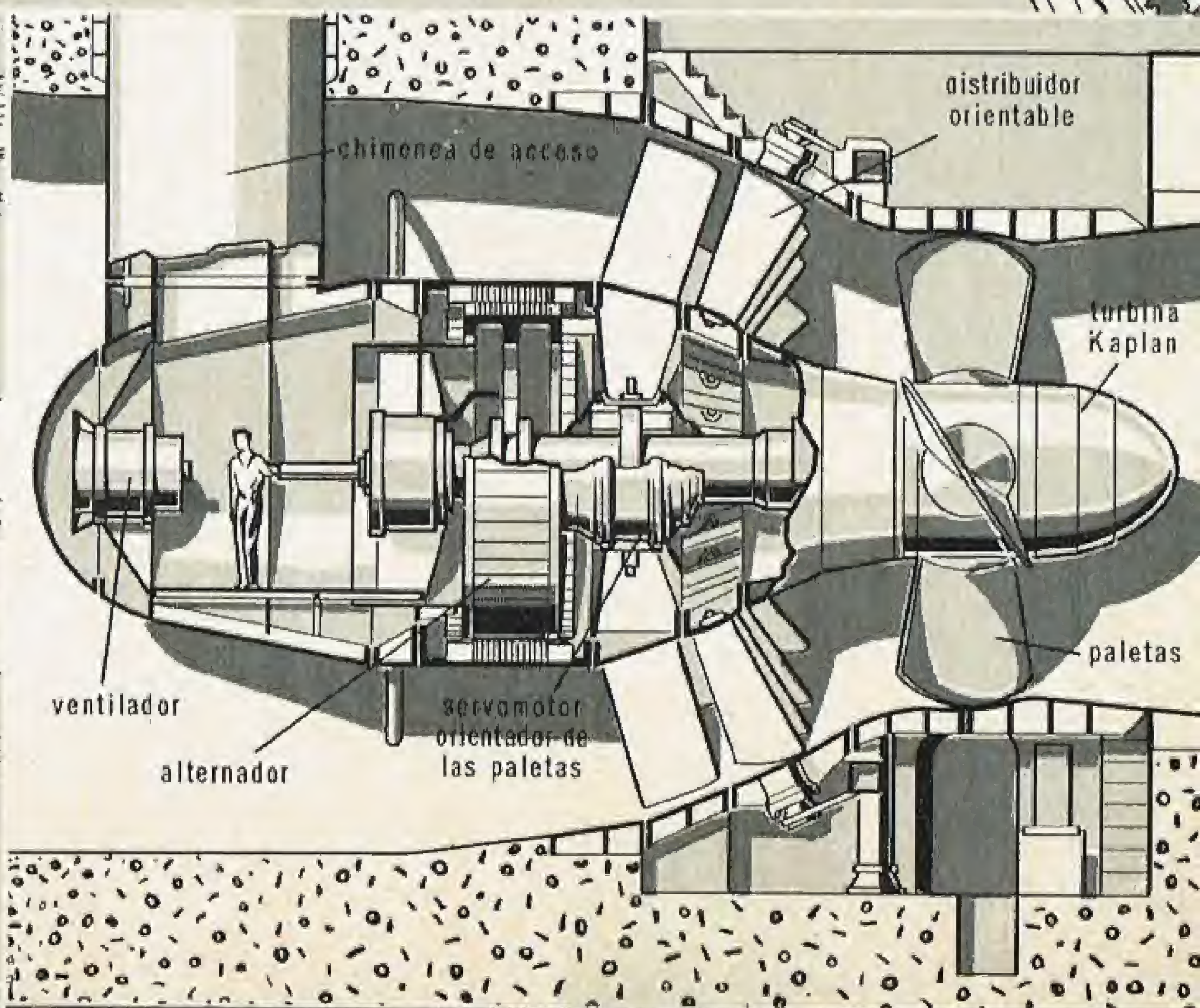
Ventiladores elevadores que arrojan el carbón en polvo al mismo piso de los tres mecheros.

CENTRAL MAREMOTRIZ DEL RANCE (FRANCIA)





SECCIÓN DE LA CENTRAL



SECCIÓN DE UN BULBO

que es el resultado indicado; también se tiene

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{L\omega}{R};$$

la corriente presenta, con respecto a la diferencia de potencial, un retraso de fase igual a φ.

Construcciones análogas permiten obtener de nuevo los resultados indicados cuando el circuito presenta una capacidad o una capacidad y una autoinducción.

Para un condensador, sin embargo, se tendrá

$$V_1 = \frac{Q}{C}, \quad \text{o} \quad i = \frac{dq}{dt}, \quad Q = \int idt;$$

por consiguiente,

$$V_1 = \frac{1}{C}\int idt.$$

i es una función sinusoidal y $\frac{1}{C}\int idt$ estará representada por un vector $\frac{I_0}{C\omega}$, con un retraso de $\frac{\pi}{2}$ con respecto al vector I_0. La figura 518 representa la resolución geométrica del caso general de un circuito con resistencia R, autoinducción L y condensador C.

Resonancia eléctrica. — Cuando L y C verifican la relación $L\omega = \frac{1}{C\omega}$, o $LC\omega^2 = 1$, la impedancia del circuito tiene el valor mínimo $Z = R$. Se dice que hay "resonancia eléctrica". La tensión en los bornes de la autoinducción pura es igual en valor absoluto, pero de sentido contrario a la tensión de los bornes del condensador: ambas se neutralizan. Pero su valor común puede ser considerablemente mayor que la tensión V que se aplica a los bornes del circuito, lo que produce sobretensiones que pueden ser peligrosas. Este fenómeno es de una importancia capital en radioelectricidad.

EJEMPLO. Un circuito alimentado por la corriente del sector (N = 50, V = 110 voltios) comprende una autoinducción en serie con una capacidad de 10 μF y una resistencia de 40 Ω. ¿Para qué valor de la autoinducción habrá resonancia?

Debe tenerse $LC\omega^2 = 1$, $L = \frac{1}{C\omega^2}$; pero $\omega = 100\,\pi$, y por consiguiente L = 1 henry. En los bornes de la autoinducción, la tensión vale $L\omega I$. Como hay resonancia, Z = R,

$$I = \frac{V}{R} = 2{,}75 \text{ A}.$$

La tensión $L\omega I = 1 \times 100\,\pi \times 2{,}75 = 863$ voltios.

En los bornes de la autoinducción habrá una tensión eficaz de 863 voltios, o una tensión máxima de 1 220 voltios.

Alternadores

Descripción. Frecuencia de la corriente producida. Excitación del alternador. Acoplamiento de los alternadores. Corrientes polifásicas. Corrientes trifásicas. Alternador trifásico. Distribución en estrella, en triángulo y mixta. Corrientes bifásicas. Alternador bifásico

Descripción. — Un alternador (*fig.* 519) —del que ya hemos dado antes un ejemplo— consta, en la práctica, de un inducido, generalmente fijo, llamado *estátor*, formado por bobinas que se arrollan en ranuras que llevan un anillo de hierro dulce laminado (para evitar las corrientes de Foucault), y sostenido por un bastidor de fundición.

El inductor o *rotor*, formado por un volante con dientes sobre los cuales se arrollan bobinas, gira ante las bobinas del inducido. El sentido del devanado de las bobinas del rotor cambia entre dos consecutivas; estas bobinas están en serie, y por ellas pasa una corriente continua de excitación que produce en los extremos de los dientes polos norte y sur, alternativamente. En las bobinas inducidas, cuyo número es igual al de dientes del rotor, el sentido del devanado también cambia entre dos consecutivas.

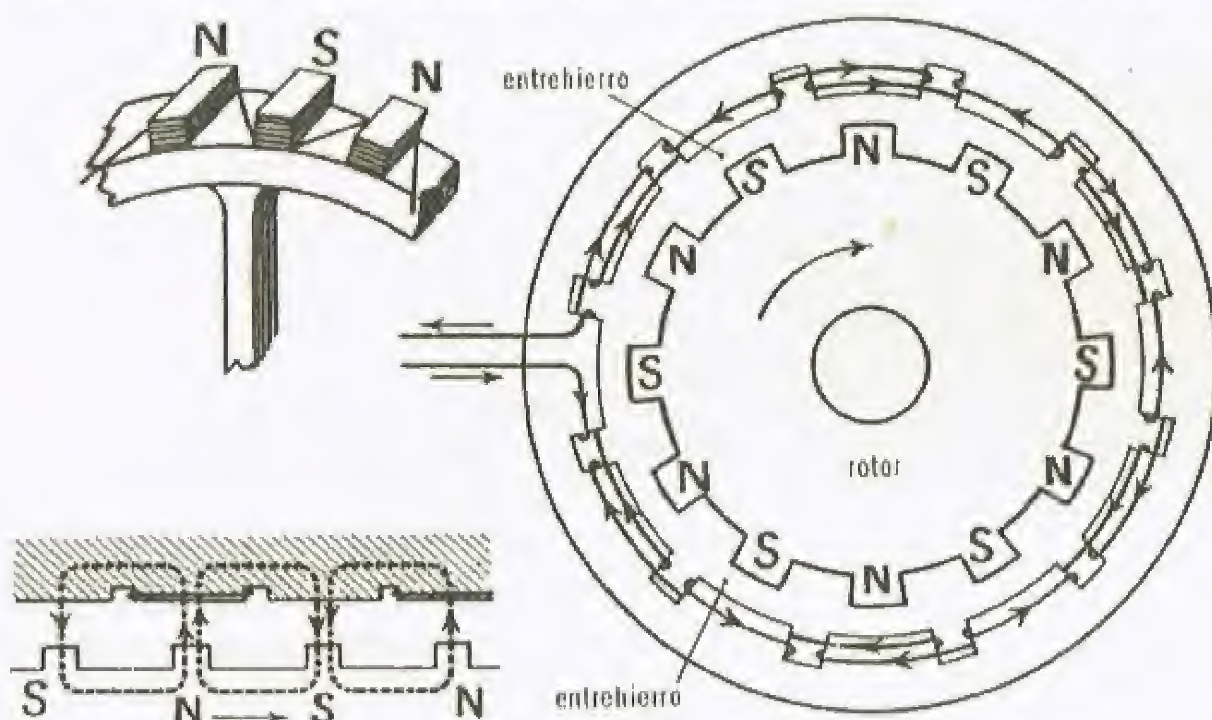


Fig. 519.—Arriba, a la izquierda, una parte del rotor; debajo, paso del flujo a las bobinas del estátor (cada bobina está reducida a una sola espira)

Cuando gira el rotor dentro del estátor, a una bobina cualquiera del inducido se aproxima un polo norte, mientras que se aleja de ella un polo sur, produciéndose dos efectos que se suman. Simultáneamente, a la bobina inmediata se acerca un polo sur y un polo norte se aleja de ella; como los devanados de dos bobinas consecutivas son de sentido contrario, y las fuerzas electromotrices inducidas también lo son, estas fuerzas electromotrices se van sumando en las bobinas sucesivas.

Cada vez que los dientes del inductor pasan por delante del punto medio de los dientes del inducido, la fuerza electromotriz de inducción cambia de sentido simultáneamente en todas las bobinas. Los dos extremos del hilo del inducido van a parar a dos bornes exteriores, que son los polos del alternador. Entre estos dos polos existe en cada instante una diferencia de potencial igual a la fuerza electromotriz de inducción total.

La corriente obtenida no es una corriente regular sinusoidal, porque la forma dentada del hierro del estátor (debido a las muescas) provoca irregularidades en la variación del flujo.

Frecuencia de la corriente producida. — Cada vez que el rotor o inductor gira el ángulo que separa dos polos consecutivos del mismo nombre —es decir, de dos en dos bobinas— se reproducen fenómenos idénticos. La duración de un período de la corriente producida es, por lo tanto, igual al tiempo que emplea el rotor en girar dicho ángulo.

Si n es el número de vueltas por segundo y $2p$ el número de polos se tendrá

$$F = np, \qquad T = \frac{1}{np}.$$

Si en el rotor hay 40 polos, cada período corresponderá a una duración de $\frac{1}{20}$ de vuelta. Si el rotor gira 150 vueltas por minuto, o sea $\frac{150}{60} = 2{,}5$ vueltas por segundo, en un segundo transcurrirán

$$20 \times 2{,}5 = 50 \text{ períodos}.$$

Por consiguiente, la frecuencia de la corriente producida será de 50 períodos por segundo.

En la práctica, esta frecuencia varía entre 16 y 50.

Excitación del alternador. — La corriente continua de excitación se obtiene por medio de una dinamo pequeña montada sobre el mismo árbol que el alternador, y arrastrada por él. La potencia que absorbe es sólo una pequeña parte de la potencia del alternador (1 a 2 por 100).

La dinamo suele ser excitada, con frecuencia, separadamente, por una batería de acumuladores.

Acoplamiento de los alternadores. — En los momentos de consumo máximo de corriente alterna —al caer el día, por ejemplo— hay que proporcionar a la red una intensidad tal que es menester acoplar en paralelo varios alternadores. Es necesario que estos alternadores tengan la misma fuerza electromotriz, la misma velocidad y la misma fase. Aparatos especiales llamados *indicadores de fase* (lámparas de incandescencia) permiten realizar el acoplamiento.

Corrientes polifásicas. — Se llama *sistema de corrientes polifásicas* el conjunto de n corrientes alternas del mismo período T, entre las cuales existe un desfasaje mutuo de $\frac{T}{n}$.

Las intensidades de estas corrientes en el instante t son, respectivamente,

$$i_1 = I\cos\omega t,\ i_2 = I\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{n}\right)\ldots$$

$$i_n = I\cos\left(\omega t - \frac{2(n-1)\pi}{n}\right).$$

En la práctica se emplean sobre todo las corrientes trifásicas, $n = 3$, y bifásicas, que se pueden considerar como corrientes de cuatro fases, $n = 4$.

Corrientes trifásicas. — Es un conjunto de tres corrientes alternas del mismo período, con un corrimiento de fase entre ellas de un tercio de período (*fig.* 520); las intensidades de las tres corrientes son expresadas por las fórmulas

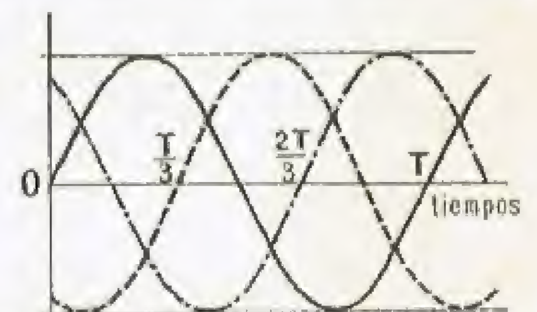


Fig. 520

$$i_1 = I\operatorname{sen}\omega t,\ i_2 = I\operatorname{sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$i_3 = I \operatorname{sen}\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = I \operatorname{sen}\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right).$$

La figura muestra que las corrientes no tienen en ningún momento el mismo sentido, ya que cada corriente es, sucesivamente y siempre en el mismo orden, de sentido inverso de las otras dos.

$$i + i_2 + i_3 =$$

$$= I\left[\operatorname{sen}\omega t\left(1 + 2\cos\frac{2\pi}{3}\right) + \cos\omega t\left(\operatorname{sen}\frac{2\pi}{3} - \operatorname{sen}\frac{2\pi}{3}\right)\right] =$$

$$= 0.$$

La suma algebraica de las tres corrientes es, pues, siempre nula.

Alternador trifásico. — El conjunto de las tres corrientes trifásicas es producido por un alternador trifásico análogo a los alternadores ordinarios, pero que tiene tres veces más bobinas en el estátor que polos en el rotor. Cada devanado se obtiene reuniendo las bobinas de tres en tres. Las corrientes alternas inducidas en cada devanado presentan entre sí una diferencia de período de un tercio.

Distribución en estrella. — Un alternador trifásico con tres circuitos en el estátor debería llevar normalmente seis bornes (tres de entrada y tres de salida). Estos seis bornes se reducen a cuatro, o a tres, por medio de uno de los montajes siguientes.

En el montaje en estrella, los tres devanados tienen un punto de partida O (punto neutro). Estos tres devanados terminan en tres bornes ABC que son los polos del alternador.

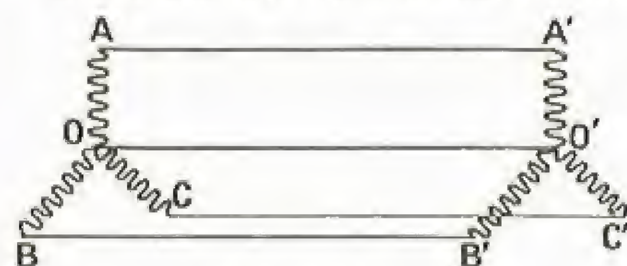


Fig. 521

Para transmitir la corriente a una estación receptora, se empalman los bornes a tres hilos de línea aislados AA', BB', CC', que desembocan en el lugar de utilización (*fig.* 521). Si los aparatos de utilización son lámparas de incandescencia, podrán montarse unas sobre otras en derivación, una parte entre A' y O', otra parte entre B' y O', y el resto entre C' y O'. De esta forma se tienen tres circuitos distintos o puentes. Si estos puentes estuvieran equilibrados, es decir, absorbieran la misma intensidad, el hilo OO' sería recorrido por la suma de esas tres corrientes trifásicas de la misma amplitud, que sería nula; y entonces podría suprimirse el hilo OO'.

Distribución en triángulo. — Los tres devanados del alternador están en serie tal, que si se recorre el triángulo entero en un sentido determinado se siguen los sentidos positivos de las tres corrientes. Los tres hilos de línea están conectados con los vértices del triángulo (*figura* 522). Los aparatos receptores pueden agruparse en triángulo.

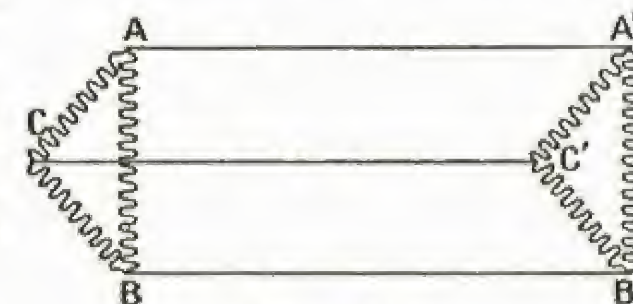


Fig. 522

Distribución mixta. — Es aquella en que los circuitos generadores están agrupados en triángulo, por ejemplo, y los circuitos receptores en estrella.

Corrientes bifásicas. — Es un conjunto de dos corrientes alternas del mismo período con un desfasaje mutuo de un cuarto de período. Las intensidades respectivas son

$$i_1 = I \operatorname{sen}\omega t, \quad i_2 = I \operatorname{sen}\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = -I\cos\omega t.$$

Alternador bifásico. — Es análogo al alternador trifásico, pero el estátor sólo contiene dos bobinas por polo del rotor, y dos devanados inducidos diferentes. Dos de los bornes de estos devanados se reúnen en un mismo punto O, de forma que la transmisión de la corriente se efectuará por una línea de tres hilos, siendo OO' el conductor de retorno.

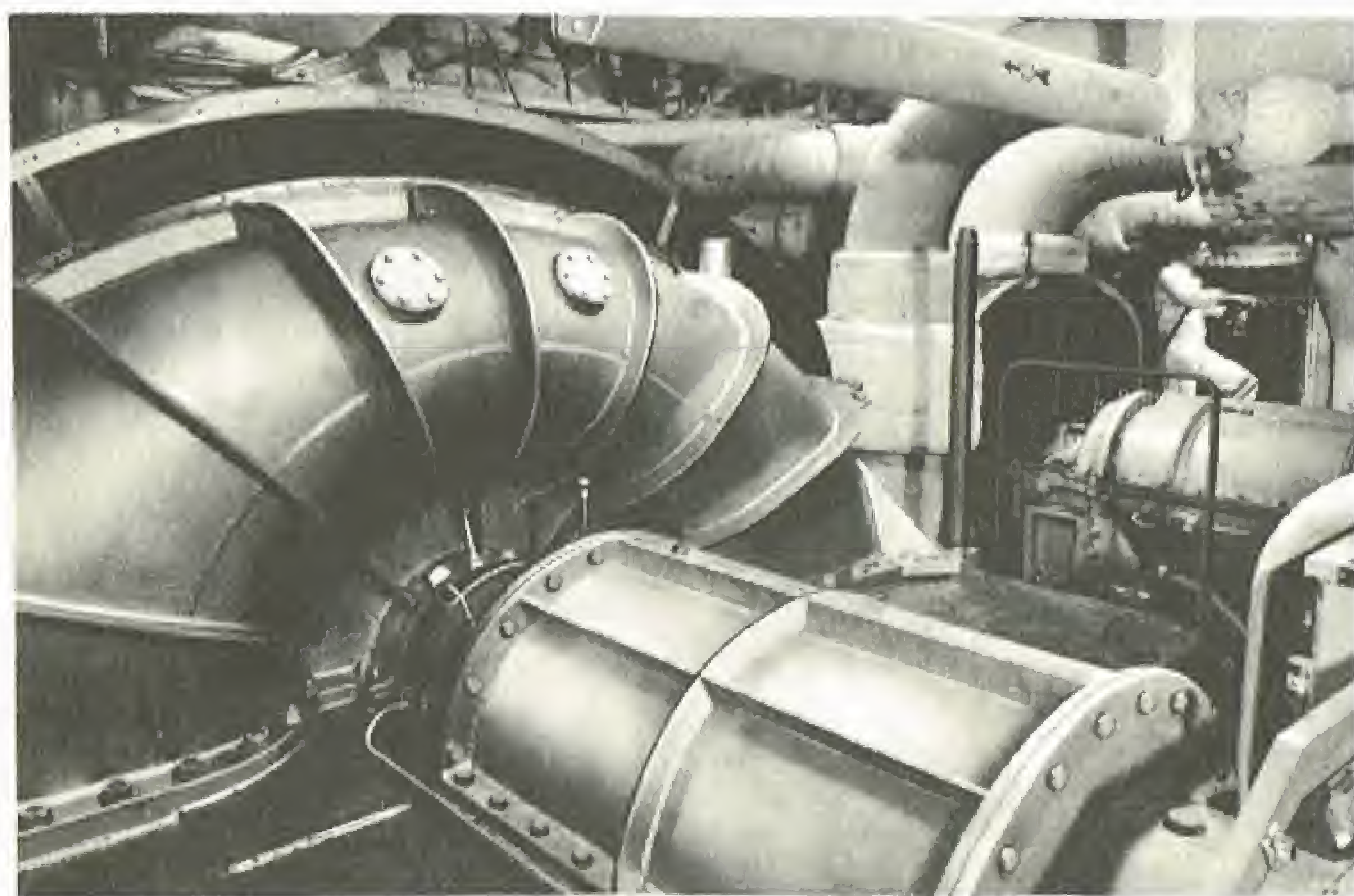
Marcel LAPORTE

Motores de corriente alterna

Clasificación. Motor sincrónico monofásico. Arranque de los motores sincrónicos. Motores sincrónicos de corrientes polifásicas. Campo rotatorio. Generalización. Campo rotatorio multipolar. Motor de campo rotatorio. Motor asincrónico polifásico. Propiedades de los motores asincrónicos. Motores con colectores. Motores polifásicos con colectores

Clasificación. — Pueden distinguirse los motores **sincrónicos,** cuya velocidad es constante e independiente de la carga, pero que no pueden arrancar solos, y los motores **asincrónicos,** cuya velocidad depende de la carga y que comprenden los motores con *colectores* y los motores de *inducción.*

Motor sincrónico monofásico. — Tomemos un alternador monofásico cuyo rotor se excita con corriente continua. Sea N la frecuencia de la corriente producida en el estátor al girar el rotor. Alimentemos los devanados del estátor con una corriente alterna de frecuencia N e invirtamos el sentido de la corriente continua del rotor; el rotor continuará girando con la misma velocidad angular, suministrando trabajo al exterior. A esta velocidad, el motor está sincronizado con la corriente alterna de alimentación; no puede arrancar por sus propios medios, ya que si se envía al estátor corriente alterna y corriente continua al rotor en reposo, los polos de este último son solicitados N veces por segundo en un sentido y N veces por segundo en el otro sentido.


Sala de máquinas del transatlántico francés «France» (*Fot. La Photothèque*)

Arranque de los motores sincrónicos. — Este arranque suele obtenerse por medio de un motor auxiliar cualquiera por ejemplo, la dinamo excitatriz, que suministra la corriente a las bobinas del rotor durante la marcha normal. Para saber cuándo se ha alcanzado la velocidad de sincronización, se utilizan lámparas montadas en serie sobre los secundarios de los dos transformadores, cuyos primarios están alimentados uno por el generador y otro por el motor; mientras que las frecuencias de estas dos máquinas son desiguales, la tensión en el secundario varía periódicamente y las lámparas se encienden y se apagan. Cuando se ha conseguido la sincronización, las fuerzas electromotrices inducidas en los secundarios son iguales y opuestas, su suma es nula y las lámparas se apagan; entonces se cierra el interruptor que une el alternador con el motor.

Los motores sincrónicos son convenientes para las aplicaciones que necesitan una velocidad constante y un par motor poco variable; su ventaja es que pueden provocar un avance de corriente sobre el voltaje y, por consiguiente, mejorar el factor de potencia. Son, pues, económicos.

Recordemos que si el factor de potencia es cos φ, P la potencia absorbida por un abonado y V la tensión eficaz, el sector debe suministrar una corriente de intensidad

$$I = \frac{P}{V\cos\varphi};$$

cuanto mayor sea cos φ, menor será la intensidad suministrada por el sector. Los inconvenientes de los motores sincrónicos es que no pueden arrancar solos y que exigen, además de la corriente alterna, un generador de corriente continua que alimente el inductor, inconvenientes que limitan su empleo.

Motores sincrónicos de corrientes polifásicas. — Los motores sincrónicos polifásicos son alternadores polifásicos que funcionan de manera reversible. Los diversos circuitos del estátor ejercen en todo momento sobre el rotor, acciones del mismo sentido. Este sentido es constante si el rotor gira en condiciones sincrónicas. Pueden arrancar espontáneamente, y para ello basta con cerrar el circuito del rotor sobre sí mismo. La máquina se convierte entonces en un motor de campo rotatorio, arrancando el rotor, una vez alcanzado el sincronismo; en ese momento se establece en las bobinas del rotor la corriente continua.

Campo rotatorio. — Consideremos (*fig.* 523) dos corrientes bifásicas

$$i_1 = I\cos\omega t,$$
$$i_2 = I\operatorname{sen}\omega t,$$

y supongamos que recorren dos bobinas B_1, B_2 que producen en un punto O campos magnéticos rectangulares. La corriente i pasa a B_1 y produce en O un campo dirigido según Ox, proporcionl a i_1, representado por

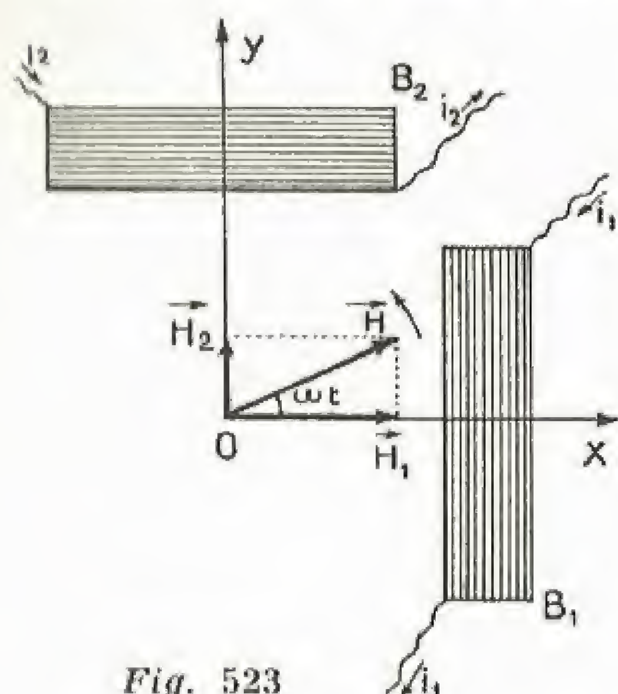


Fig. 523

$$H_1 = Gi_1 = GI \cos \omega t.$$

i^2 pasa a B_2 y produce en O un campo dirigido según Oy.

$$H_2 = Gi_2 = GI \text{ sen } \omega t.$$

Como las bobinas son idénticas y están dispuestas de la misma manera con respecto a O, G es igual para los dos campos.

El campo magnético $\vec{H}$ en O es la resultante de H_1 y H_2.

$$H = \sqrt{H_1^2 + H_2^2} = GI$$

y forma con Ox el ángulo α tal que

$$\text{tg} \cdot \alpha = \frac{H_2}{H_1} \text{ tg } \omega t,$$

$$\alpha = \omega t.$$

El campo magnético creado en O por las dos bobinas fijas recorridas por las corrientes bifásicas tiene, pues, una intensidad constante, y su dirección gira un número de vueltas por segundo igual a la frecuencia de las corrientes.

Este campo es el que se denomina *campo rotatorio.*

Generalización. — Consideremos ahora n corrientes polifásicas de n fases, que recorren n bobinas cuyos ejes concurren en un punto O y forman entre sí ángulos $\frac{2\pi}{n}$. Si los valores máximos del campo son iguales entre sí para todas las bobinas, se demuestra que el vector-campo resultante tiene una magnitud constante y que gira, efectuando una rotación completa, durante un período de las corrientes.

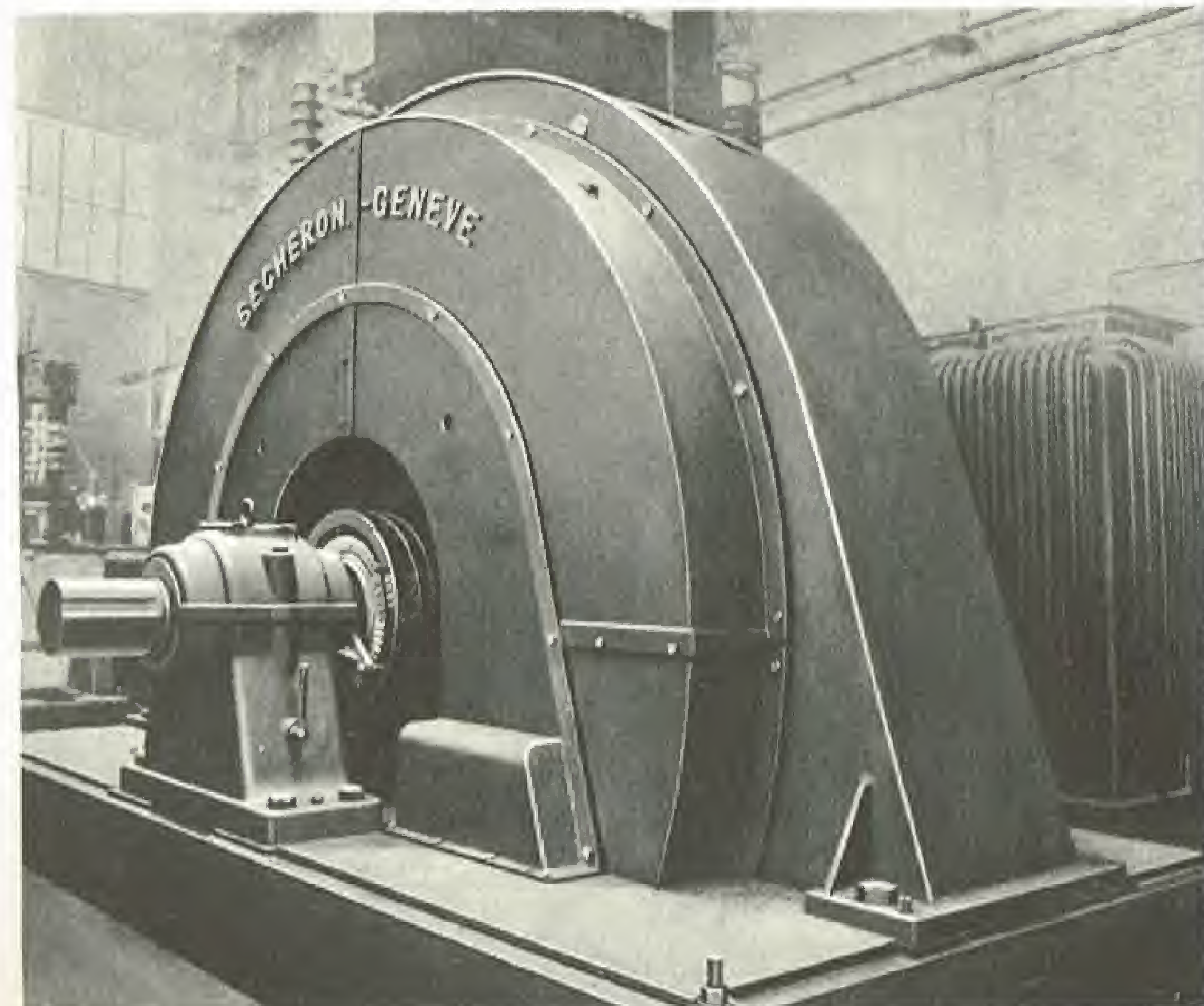
Campo rotatorio multipolar. — Se demuestra que las corrientes que recorren los devanados del estátor de un alternador polifásico de $2n$ polos producen en su interior un *campo rotatorio multipolar* idéntico al que producirían $2n$ polos alternativamente norte y sur, situados en la cara interna del inducido y girando de forma que un polo norte substituya al polo norte anterior durante un período.

Motor de campo rotatorio. — Sea una masa M que puede girar en un campo rotario multipolar (*fig.* 524). Si es fija, la rotación del campo en el sentido f determina en M corrientes inducidas, que son las mismas que si el campo hubiera sido fijo y M hubiera girado en el sentido f' inverso de f. En virtud de la ley de Lenz, el campo fijo habría ejercido sobre las corrientes inducidas fuerzas resistentes al movimiento, actuando, pues, en sentido inverso de f', es decir, en el sentido de f.

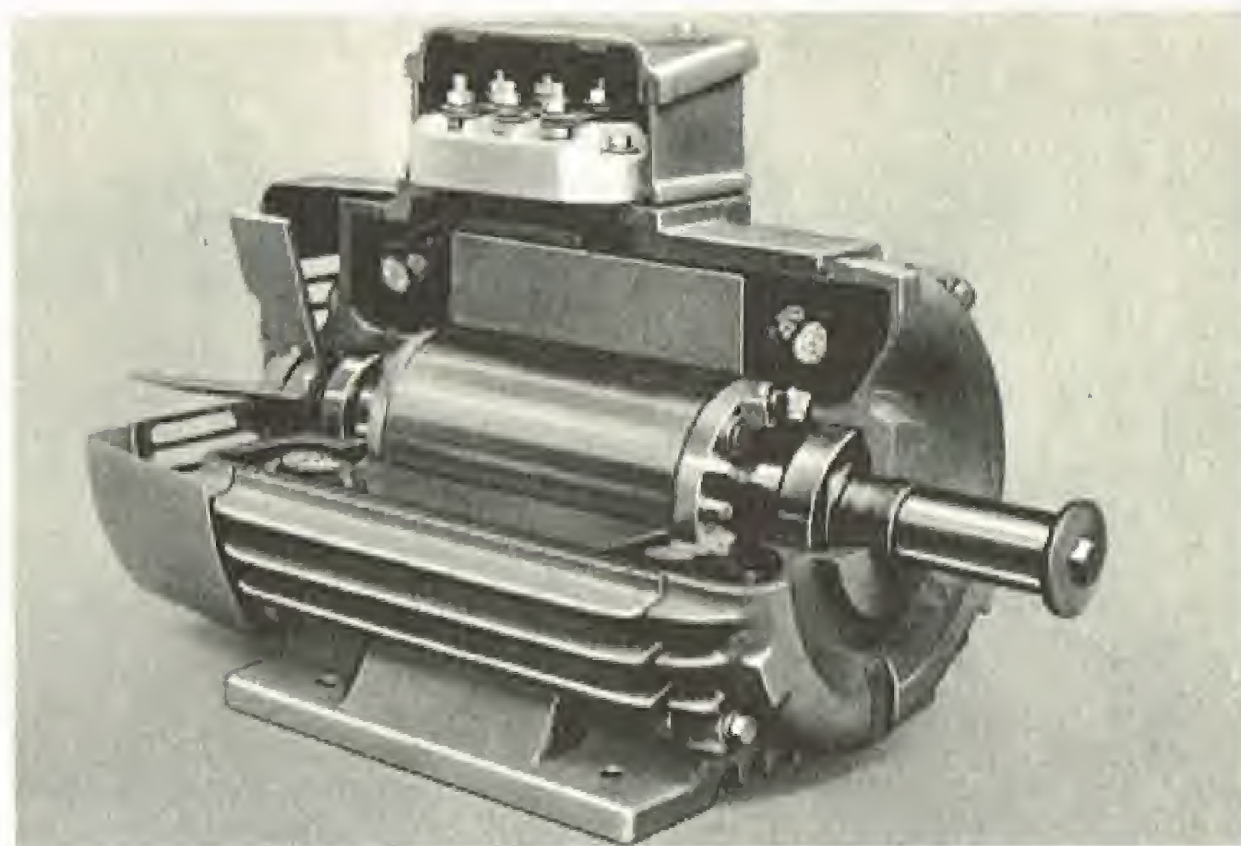
f
f'
M

Fig. 524

Esto es lo que sucede en realidad: M se pone a girar en el mismo sentido que el campo, sin llegar a alcanzar nunca su velocidad, porque si la alcanzara, al dejar de existir el desplazamiento relativo del campo y de M, desaparecerían las fuerzas electromagnéticas y M ya no sería arrastrado.



Motor asincrónico compensado de 3 000 CV (*Documento Secheron*)



Motor asincrónico de corriente trifásica y rotor de anillos, desmontado (*Fot. Als.-Thom*)

El conjunto constituye un **motor asincrónico,** cuya velocidad disminuye a medida que aumenta la resistencia opuesta al movimiento.

Se llama **deslizamiento** del motor la relación

$$G = \frac{\text{Velocidad del campo} - \text{velocidad del rotor}}{\text{Velocidad del campo}}.$$

En un motor parado G = 1, y en un motor sincrónico G = O, el deslizamiento varía entre esos dos valores, pero se aproxima tanto más a la unidad cuanto más cargado esté el rotor. Es del orden del 3 al 5 por ciento.

Motor asincrónico polifásico. — El estátor de este motor es idéntico al de un alternador polifásico: a sus devanados, se envían las corrientes polifásicas para las cuales se ha construido, que producen un campo rotatorio multipolar.

El rotor debe constituir un circuito cerrado sobre sí mismo. Para los pequeños motores, tiene la forma de *jaula de ardilla,* es decir, está formado de barras de cobre unidas a dos anillos del mismo metal (*fig.* 525). El interior de la jaula está lleno de un núcleo de hierro laminado, destinado a concentrar el flujo de inducción. El campo rotatorio engendra corrientes inducidas intensas que mueven la jaula en el mismo sentido que el campo.

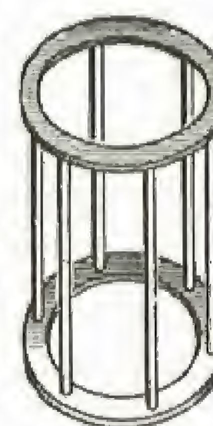


Fig. 525

Los motores grandes tienen un rotor con **devanados en carrete.** Los devanados son, en general, trifásicos y *análogos a los del estátor,* cerrados sobre sí mismos.

Para que arranquen estos motores, se cierra el circuito del rotor sobre las resistencias, que tienen como objeto limitar la corriente en el momento del arranque: después se retiran progresivamente estas resistencias, que se eliminan cuando se ha alcanzado el régimen.

Propiedades de los motores asincrónicos. — Poseen una gran facilidad de arranque, sin que haya que prever su excitación ni ofrezcan riesgo de calarse, y su velocidad es sensiblemente constante. Son muy empleados en la industria. Su factor de potencia, en cambio, es poco elevado, y su velocidad difícil de regular.

Motores con colectores. — Un motor serie de corriente continua puede funcionar con una corriente alterna monofásica, porque la corriente se invierte al mismo tiempo en el anillo y en los inductores. Este tipo de motor tiene un pequeño factor de potencia y las variaciones de corriente determinan en él fuerzas electromotrices que provocan chispas que deterioran rápidamente el colector. Estos motores tienen la ventaja de poseer un par de arranque elevado, por lo que son utilizados para la tracción.

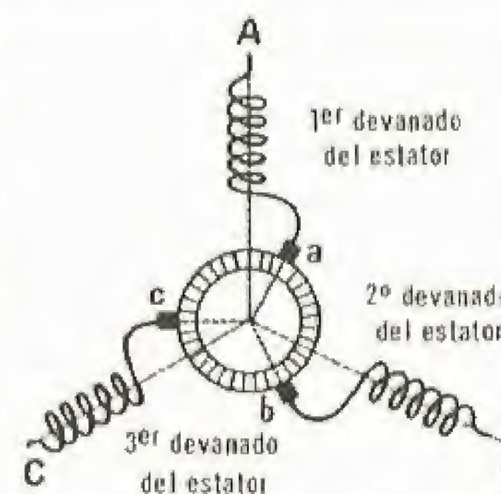


Fig. 526

Motores polifásicos con colectores. — El estátor es un estátor de motor polifásico y el rotor un rotor de corriente continua.

En un motor trifásico, por ejemplo, el rotor lleva tres escobillas (*fig.* 526). El rotor y el estátor son alimentados sucesivamente por el mismo conjunto de corrientes trifásicas.

La velocidad se regula por medio del desfasaje de las escobillas.

Transformadores

Principio y descripción. Rendimiento. Utilización de los transformadores. Transformadores de corrientes polifásicas. Conmutatrices. Grupo motor-generador. Rectificadores de corrientes de vapor de mercurio. Válvulas electrolíticas. Rectificadores de óxido de cobre. Lámpara-válvula. Carrete de Ruhmkorff. Interruptor de Wehnelt. Condensador de Fizeau

Principio y descripción. — Son aparatos destinados a transformar una corriente alterna en otra de la misma frecuencia, siendo diferentes los valores de la fuerza electromotriz a la entrada y a la salida del aparato.

Constan de un núcleo de hierro dulce laminado, cerrado sobre sí mismo, sobre el cual se arrollan dos circuitos: el *primario* y el *secundario*. Si el primario es recorrido por una corriente alterna, producirá en el núcleo de hierro dulce un flujo de inducción alterno. En el secundario se creará entonces una corriente inducida que, en virtud de la ley de Lenz, tenderá a crear un flujo magnético opuesto igualmente alterno. La corriente inducida en el secundario será, pues, alterna y de la misma frecuencia que la corriente primaria.

Principio del transformador

En cada espira, tanto primaria como secundaria, se desarrollará la misma fuerza electromotriz e.

Si n_1 es el número de espiras del primario y n_2 el del secundario, se tendrá

$e_1 = n_1e$, fuerza electromotriz total en el primario,
$e_2 = n_2e$, " " " " secundario.

Pero,

$e_1 = v_1$, diferencia de potencial en el borne de entrada,
$e_2 = v_2$, " " " " salida.

Si V_1 y V_2 son las diferencias de potencial eficaces correspondientes, se tendrá

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{n_2}{n_1} = \text{relación de transformación.}$$

Se tiene:

$$V_2I_2 = V_1I_1,$$

de donde

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{n_1}{n_2};$$

la intensidad disminuye en la relación donde la tensión es elevada, o viceversa.

Así, pues, según la corriente que haya que transformar sea admitida en el circuito que contiene el menor o el mayor número de espiras, se colectará en el otro circuito, en el primer caso, una corriente de mayor tensión y menor intensidad (*elevador de tensión*); en el segundo, una corriente de tensión menor y de intensidad mayor, permaneciendo la relación de transformación igual a la relación entre los números de espiras de los dos circuitos (*reductor de tensión*).

Rendimiento. — En la practica, e_1 y e_2 no son exactamente proporcionales a n_1 y n_2, a causa de las fugas magnéticas.

Además, las diferencias de potencial v_1 y v_2 son inferiores a e_1 y e_2 a causa de las resistencias. El valor v_2 es menor que el obtenido anteriormente.

Por último, a causa de las pérdidas de energía por el efecto Joule, por las corrientes de Foucault y por las histéresis, P_2 es inferior a P_1.

La relación $\frac{P_2}{P_1}$ es el rendimiento del transformador, que es muy grande (0,95, aproximadamente).

Este valor elevado ha permitido el desarrollo de los transformadores.

Utilización de los transformadores. — El transporte de energía a largas distancias se efectúa con pérdidas por el efecto Joule, RI^2. Si la intensidad de la corriente es muy grande, estas pérdidas son elevadas. No puede disminuirse fácilmente R, porque ello equivaldría a aumentar la sección de los hilos de la línea, lo que resultaría extremadamente costoso: se está entonces obligado a disminuir I. Además, para transmitir la potencia $P = VI$, siendo V la diferencia de potencial en los bornes del generador, hace falta aumentar V al mismo tiempo que se disminuye I; de ahí el empleo de los transformadores. El elevador de tensión se utiliza a la salida del generador, y el reductor de tensión a la entrada de los aparatos de utilización.

La facilidad con que los transformadores permiten modificar a voluntad la tensión de una corriente alterna es la razón de la superioridad indiscutible de la corriente alterna sobre la corriente continua, desde el punto de vista de la transmisión de energía eléctrica.

Incluso cuando se tiene necesidad de corriente continua para la alimentación de los aparatos de utilización, resulta ventajoso producir y transportar corriente alterna, siempre que a la llegada se la transforme en continua por medio de una conmutatriz, de un grupo motor generador, de un convertidor o de un rectificador.

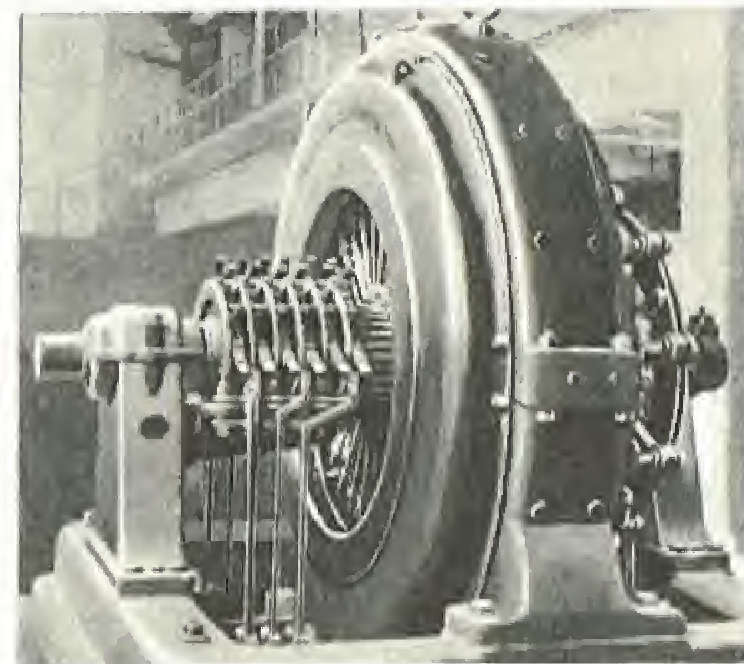
Para limitar el calentamiento, que en los grandes transformadores se haría rápidamente peligroso, se sumerge el núcleo y los devanados en un recipiente con aceite, que está a su vez refrigerado por agua fría.

Transformadores de corrientes polifásicas. — Cuando se trata de corrientes polifásicas, puede colocarse un transformador en cada una de las fases; es menos voluminoso emplear un transformador polifásico que transforme simultáneamente todas las fases.

Un transformador trifásico lleva tres núcleos de hierro dulce reunidos por dos culatas. Sobre cada uno de ellos se arrollan los circuitos primarios y secundarios de una misma fase. Hay tres circuitos magnéticos montados en estrella, y los flujos se anulan en las culatas.

Conmutatrices. — Son máquinas que permiten transformar a voluntad la corriente alterna en corriente continua, e inversamente.

Una conmutatriz está constituida por un inducido de dinamo provisto, por un lado, de un colector y de escobillas, y por el otro, de anillos y frotadores. El aparato puede, pues, servir simultáneamente ya de motor alimentado por corriente continua y de alternador, ya de motor alimentado por corriente alterna y de dinamo.



Conmutratiz de tracción de 1 000 kW

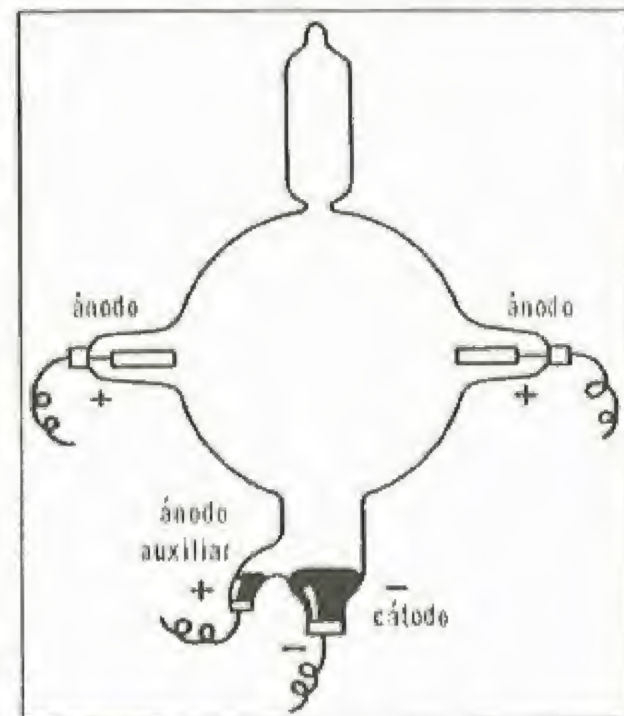
La transformación más empleada es la de corriente alterna en continua. En este caso, la conmutatriz actúa como un motor de corriente alterna sincrónico, lo que carece de inconvenientes. También se prefiere con frecuencia utilizar un grupo motor-generador.

Grupo motor-generador. — Es un motor de corriente alterna —que puede ser asincrónico— acoplado rígidamente a una dinamo.

Rectificadores de corrientes de vapor de mercurio. — Si se alimenta con una corriente alterna un arco eléctrico entre dos carbones desiguales, la corriente pasará más fácilmente del carbón grande al pequeño, por estar más caliente. Un arco con carbones desiguales actúa, pues, como una *válvula*, no dejando pasar la corriente más que en un sentido. Se dice entonces que la corriente alterna se ha *rectificado*.

El efecto es todavía más sensible cuando el arco se produce con mercurio, en el vacío. Cooper-Hewitt ha basado en este efecto potentes rectificadores de corrientes alternas, que llevan tubos de vapor de mercurio. El cátodo incandescente emite electrones que golpean los iones de mercurio en suspensión en forma de vapor. Estos choques provocan nuevas emisiones de electrones, que encuentran nuevos iones, y así sucesivamente hasta que se alcanza el ánodo. En estas condiciones puede obtenerse una corriente de intensidad elevada. Si se unen los electrodos a una corriente alterna, la corriente no pasa en la ampolla más que cuando el electrodo de mercurio actúa como cátodo, es decir, durante las semiondas positivas de la corriente alterna. Se tiene, pues, una corriente siempre del mismo sentido, pero intermitente.

Entonces se emplea el siguiente artificio: la corriente alterna llega al primario de un transformador cuyo devanado secundario está ligado a la válvula por dos ánodos en vez de uno; el cátodo está unido con el punto medio del devanado secundario. En el primario, la corriente pasa por los dos sentidos, pero se ve que en la conexión entre el punto medio del devanado secundario y el cátodo la corriente pasará siempre en el mismo sentido.



Rectificador de vapor de mercurio

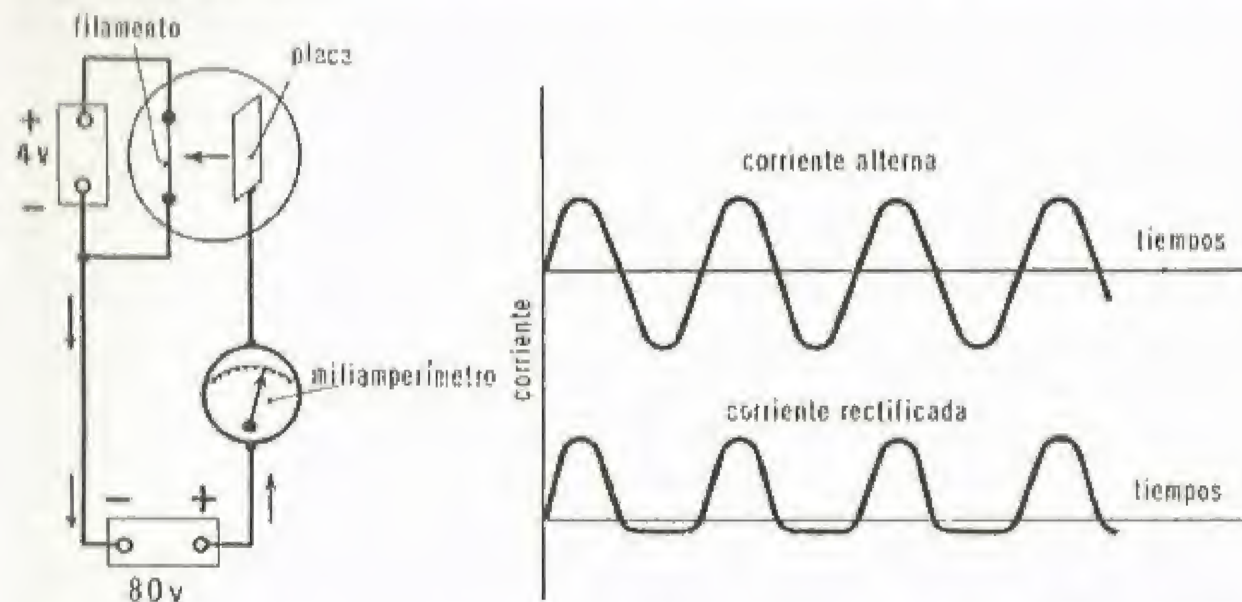
Para la corriente trifásica se emplean rectificadores de 6, 12, 18 ó 24 ánodos.

Válvulas electrolíticas. — Cuando se produce una electrolisis entre un electrodo de aluminio y otro de plomo, si el primero es ánodo, se cubre inmediatamente de una capa aisladora de alúmina que interrumpe la corriente. Esta capa se destruye desde el principio de la alternancia inversa siguiente, que puede pasar.

Rectificadores de óxido de cobre. — El elemento rectificador es un disco de cobre en cuya superficie se ha formado una capa de óxido de cobre muy fina. Si se estudia el paso de la corriente eléctrica perpendicularmente a la superficie de separación del cobre y del óxido, se encuentra que la resistencia del conjunto es menor en el sentido óxido-cobre que en el sentido inverso. Para rectificar las dos alternancias de una corriente alterna se emplean cuatro arandelas montadas en forma de puente de Wheatstone. El selenio, el germanio y el silicio dan también contactos cuya resistencia varía mucho según el sentido de la corriente, y son empleados corrientemente en los rectificadores secos y en ciertos detectores.

Lámpara-válvula. — Cuando el filamento de una lámpara de incandescencia alcanza una temperatura elevada, la agitación de los elec-

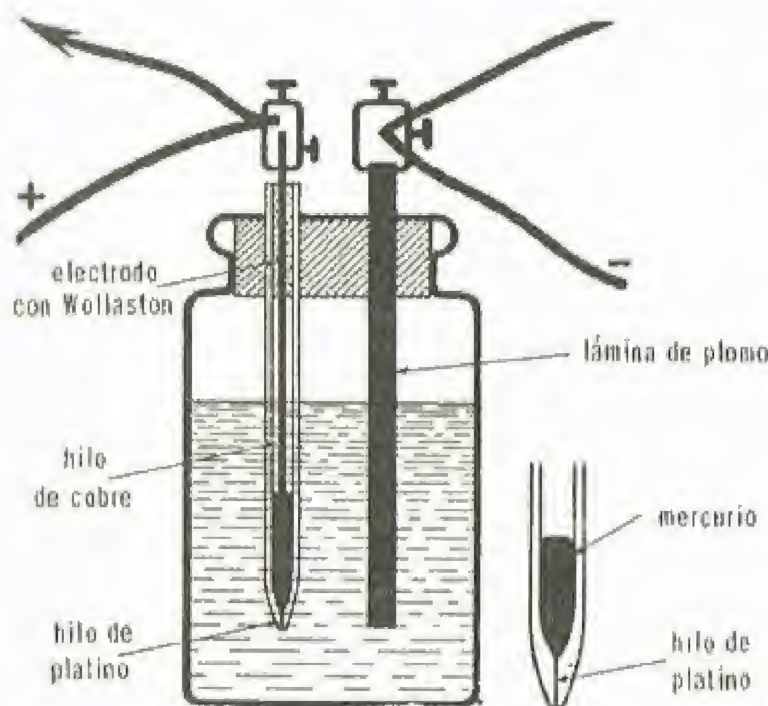
trones superficiales tiende a liberarlos de la atracción que los retiene en la superficie; pero estas partículas negativas, que gravitan en la proximidad del filamento, rechazan los otros electrones que tratarían de escaparse, formándose una especie de nube de electricidad negativa alrededor del filamento. Coloquemos en la ampolla una placa metálica, a un potencial positivo con respecto al filamento; esta placa atraerá los electrones de este último, destruyendo la carga espacial, con lo que se establecerá un flujo de electrones del filamento a la placa: es la corriente de placa.



Lámpara-válvula diódica. El diodo rectifica la corriente alterna por supresión casi completa de una de las dos alternancias

Como la corriente de placa no existe más que cuando ésta actúa como ánodo, es decir, como electrodo positivo con respecto al filamento, el *diodo*, o lámpara de dos electrodos, puede servir de válvula eléctrica; una tensión alterna aplicada entre el filamento y la placa producirá una corriente intermitente, pero *siempre del mismo sentido*. De esta forma es como se utilizan los diodos para rectificar la corriente alterna, es decir, para convertirla en corriente continua. La *detección* de la corriente de alta frecuencia (que no es más que una rectificación) fue la primera aplicación de estas lámparas.

Carrete de Ruhmkorff. — Es un transformador destinado a suministrar corrientes secundarias de alta tensión por medio de una corriente primaria continua.



Interruptor electrolítico de Wehnelt

El circuito primario del carrete de Ruhmkorff consta de un hilo grueso y corto, por el que se hace pasar una corriente continua destinada a ser interrumpida un gran número de veces por segundo. El circuito secundario es un hilo fino de varios kilómetros de longitud.

La fuerza electromotriz de inducción es tanto mayor cuanto más brusca es la ruptura de la corriente primaria. Para producir esta ruptura se utilizan martillos, interruptores de mercurio, turbinas de mercurio o interruptores electrolíticos.

El primer interruptor fue el modelo de Neef, de martillo, parecido a un timbre eléctrico, pero producía chispas de autoinducción perjudiciales para las piezas entre las cuales estallaban. Para obviar este inconveniente, Foucault propuso en 1856 un modelo de interruptor en el que las chispas saltaban entre una punta metálica y mercurio con alcohol o gas no oxidante superpuesto.

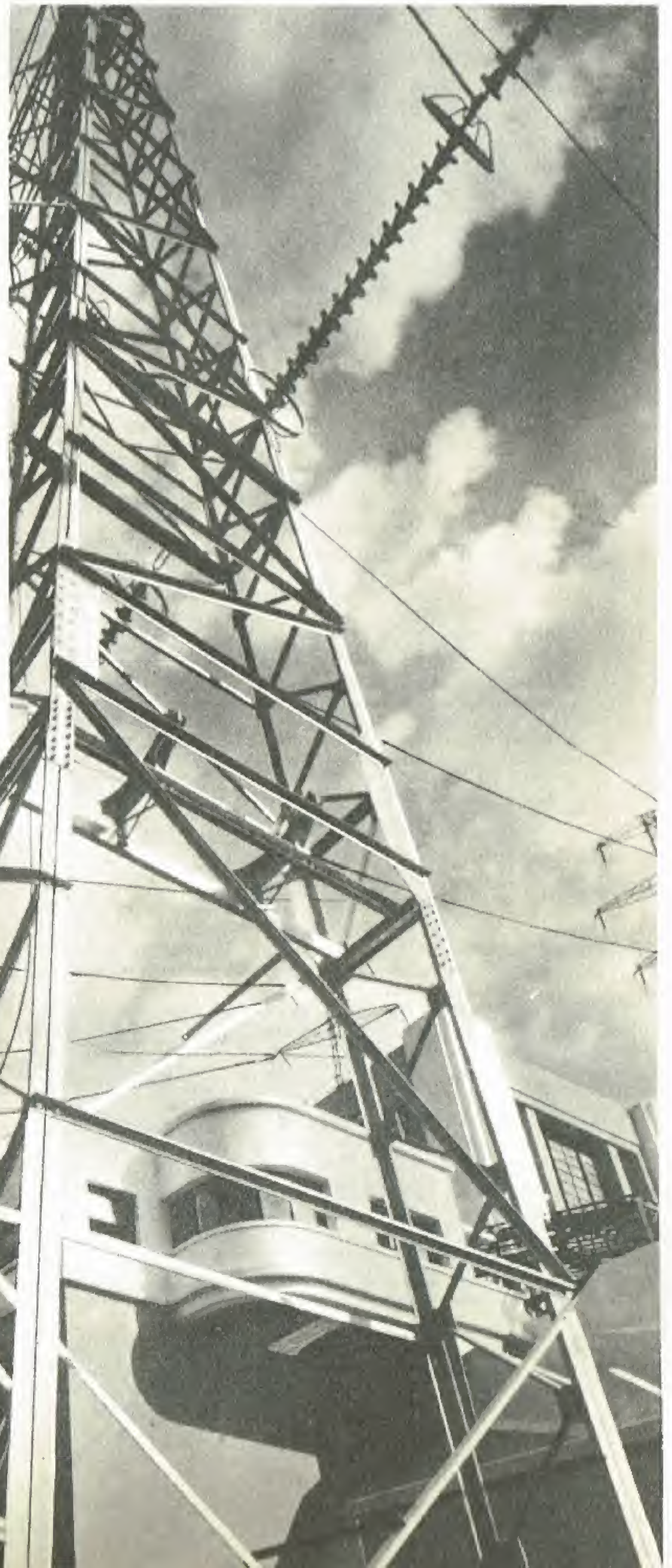
Los carretes de Ruhmkorff se utilizan para producir las chispas de encendido en los motores de explosión y en la producción de rayos X.

Interruptor de Wehnelt. — Es un recipiente que contiene agua acidulada, provisto de dos electrodos. El cátodo es una lámina de plomo y el ánodo un hilo de platino que sobresale ligeramente del fondo de un tubo de vidrio. Cuando pasa la corriente, el calor que ella desprende provoca alrededor del ánodo una vaina aisladora de vapor que la interrumpe bruscamente. Cuando el vapor se condensa, se restablece la corriente, y así sucesivamente. Regulando convenientemente la longitud del hilo de platino, se obtiene un gran número de interrupciones por segundo.

Condensador de Fizeau. — A fin de reducir las chispas del primario, Fizeau propuso, en 1853, la adjunción de un condensador de gran capacidad en derivación con el corte. Este dispositivo aumenta la tensión máxima en los extremos del secundario.

Jean HESSE y Alain TOUREN

Transformadores trifásicos (*Fot. Kollar*)



Explosión atómica submarina de Bikini (julio de 1946). Los navíos de guerra pueden tomarse como escala de comparación (*Fot. Keystone*)

Teorías modernas

El electrón y las partículas electrizadas

Rayos catódicos: Producción. Propiedades de los rayos catódicos. Propagación de los rayos catódicos. Energía cinética de los rayos catódicos. Desviación de los rayos catódicos por los campos eléctricos y magnéticos. Rayos de Lenard. — **Estudio del electrón:** Corriente de convección. Experiencia de Rowland. Aplicación de las leyes del electromagnetismo a las corrientes de convección. Acción de un campo eléctrico uniforme sobre una partícula electrizada en movimiento. Acción de un campo magnético uniforme sobre una partícula electrizada. Resultados de las medidas. Carga del electrón. Experiencia de Millikan. Masa y radio del electrón. Energía del electrón. Variación de la masa con la velocidad. — **Fenómeno termoiónico:** Emisión de electrones por efecto del calor. Energía cinética de los electrones. Teoría del fenómeno termoiónico. Aplicaciones del fenómeno termoiónico. — **Rayos positivos. El átomo:** Producción. Naturaleza de los rayos positivos. Espectrógrafo de masas. Isótopos. El átomo. — **Otras partículas electrizadas:** El electrón positivo o positón. Los mesones. — **Aceleradores de partículas electrizadas. Estudio de las trayectorias:** Ciclotrón. Betatrón. Sincrociclotrón. Aceleradores lineales. Estudio de las trayectorias. Radiación cósmica. — **Óptica electrónica e iónica:** Principios. Microscopio electrónico

Rayos catódicos

Producción. — Cuando se establece una diferencia de potencial, del orden de 40 000 a 50 000 voltios, entre dos electrodos colocados dentro de una ampolla de vidrio en la que existe una presión gaseosa comprendida entre $\frac{1}{100}$ y $\frac{1}{1\,000}$ de milímetro de mercurio, no se observa chispa eléctrica ni descarga luminosa, como se produce cuando las presiones son más elevadas. En cambio, la parte de la ampolla que se encuentra enfrente del cátodo presenta una fluorescencia verde, siendo fácil comprobar, si se dispone, por ejemplo, de una ampolla con varios ánodos (*fig.* 527), que la posición y el aspecto de la mancha fluorescente dependen sólo del cátodo, y nunca del emplazamiento del ánodo. En la figura 527, por ejemplo, la fluorescencia del vidrio se manifiesta en F, ya esté el ánodo en A o en A'. Si el gas rarificado que contiene la ampolla es el oxígeno, emite un tenue resplandor amarillo a lo largo de una columna que va desde el cátodo C a la mancha F. El fenómeno ofrece el aspecto de una radiación que parte del cátodo y que es independiente de la posición del ánodo; de aquí el nombre de *radiación catódica* que se le ha atribuido. Los aparatos donde se producen los rayos catódicos se llaman *tubos de Crookes.*

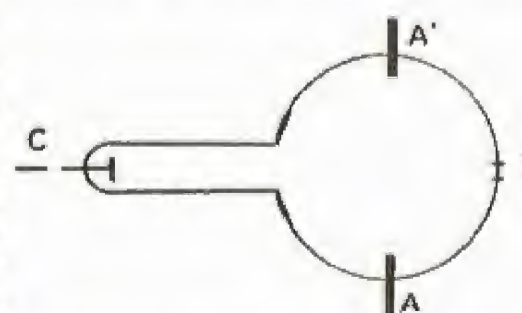
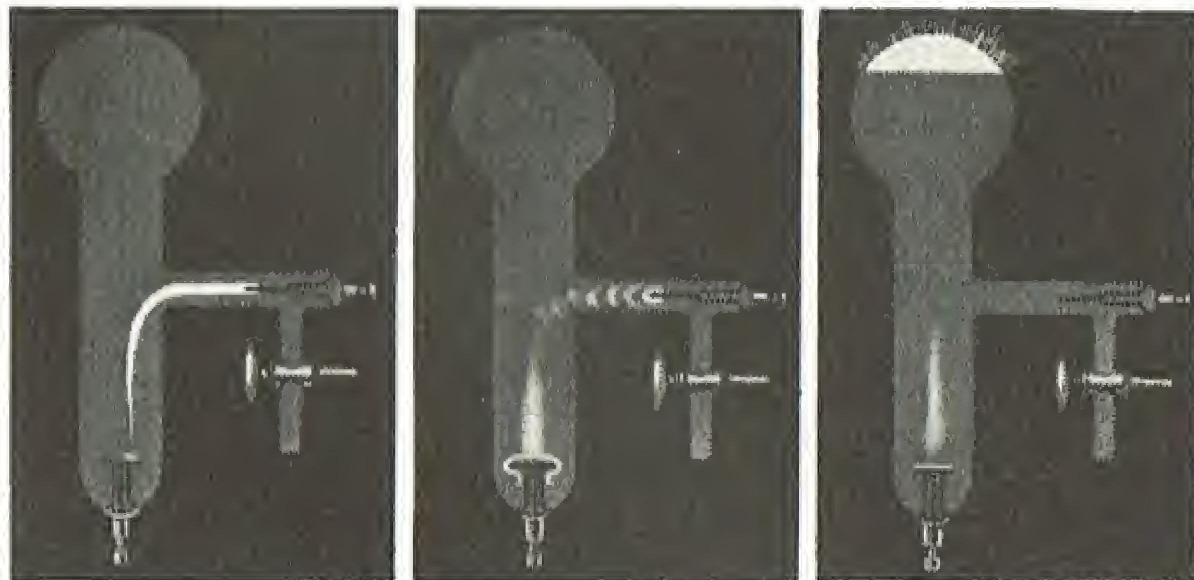


Fig. 527


Estudio de los rayos catódicos.—El vacío es cada vez más intenso de izquierda a derecha; en el último grabado de la derecha, los rayos catódicos que parten del cátodo, que está en la parte inferior, bombardean la parte superior de la ampolla y vuelven el vidrio luminiscente

Propiedades de los rayos catódicos. — Los rayos catódicos provocan la fluorescencia de un gran número de cuerpos, dependiendo la

luz emitida de la naturaleza de dichos cuerpos: verde para el vidrio y amarillo anaranjado para la creta. Producen ciertas reacciones químicas, e impresionan las placas fotográficas. Una substancia que reciba los rayos catódicos emite una radiación particular, los rayos X, que estudiaremos más adelante.

Propagación de los rayos catódicos. — *Los rayos catódicos se propagan normalmente al cátodo y en línea recta.* Si utilizamos un cátodo en forma de casquete esférico cóncavo (*fig.* 528), observaremos, gracias a la ligera luminiscencia del gas, cómo convergen los rayos catódicos en el centro de curvatura del cátodo y cómo prosiguen su trayectoria en línea recta a partir de ese punto. La propagación rectilínea puede también ponerse de manifiesto colocando una cruz de aluminio (*fig.* 529) en la trayectoria de los rayos catódicos; se observará la sombra de la cruz sobre la mancha fluorescente de la ampolla.

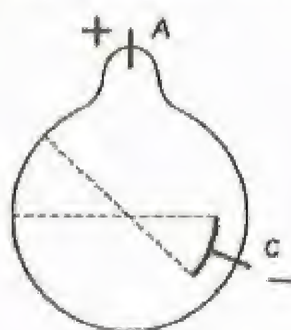


Fig. 528

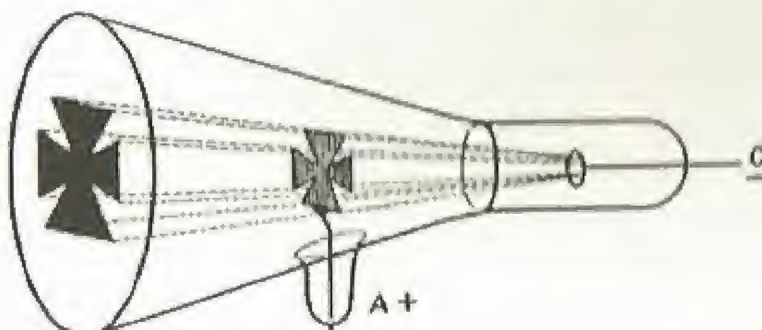


Fig. 529

Energía cinética de los rayos catódicos. — Si se proyecta un haz de rayos catódicos sobre un molinete ligero (*fig.* 530) éste se pone en movimiento. Los rayos catódicos se conducen, pues, como partículas lanzadas a gran velocidad. De ser así, la detención de estas partículas por un obstáculo debe ir acompañada de un desprendimiento de calor, equivalente a la energía cinética $\frac{1}{2} mv^2$ que se pierde.

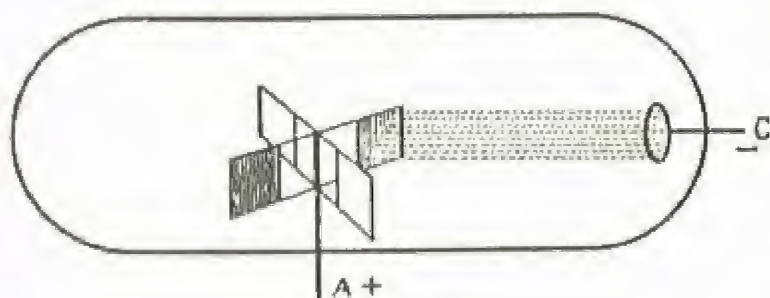


Fig. 530

Se comprueba efectivamente que una lámina de platino bastante delgada, sometida a la radiación catódica, se pone al rojo y puede incluso llegar a fundirse.

Cabe, pues, suponer, lógicamente, que los rayos catódicos están constituidos por partículas en movimiento.

Desviación de los rayos catódicos por los campos eléctricos y magnéticos. — Si se hace pasar un haz de rayos catódicos entre las armaduras de un condensador (*fig.* 531), es decir, por un campo eléctrico, se desvía. El haz se aleja de la armadura cargada de electricidad negativa; las partículas que constituyen la radiación catódica están, por consiguiente, cargadas de electricidad n e g a t i v a. Puede probarse esto directamente recibiendo el haz catódico en un cilindro de Faraday (*fig.* 532); se comprueba que éste se carga de electricidad negativa, y puede llegarse por este medio incluso a medir la carga transportada por el haz. En estas experiencias, el cilindro de Faraday debe estar protegido electrostáticamente por una jaula metálica C conectada a tierra.

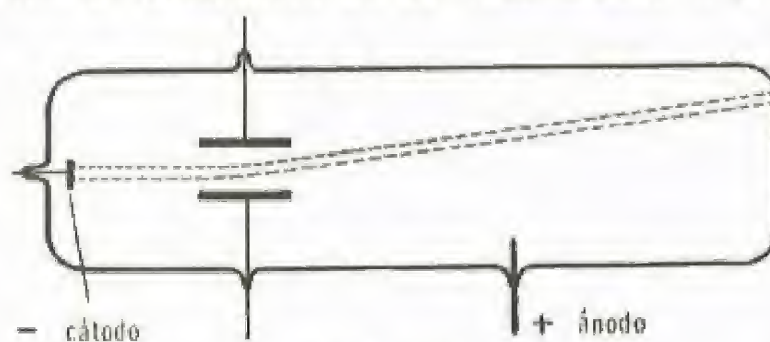


Fig. 531

La radiación catódica que transporta la electricidad negativa es una especie de corriente eléctrica, por lo que debe ser desviada por los campos magnéticos, y así lo es en efecto. Para comprobarlo, basta con aproximar un imán de herradura a un tubo de Crookes; la mancha fluorescente de la ampolla se desplaza. Se comprueba que el sentido de la desviación es el mismo que para una corriente eléctrica que se propaga en sentido inverso del rayo catódico; esto no tiene nada de extraño, puesto que la radiación catódica transporta electricidad negativa, mientras que, por convenio, el sentido de una corriente es el del desplazamiento de las cargas positivas.

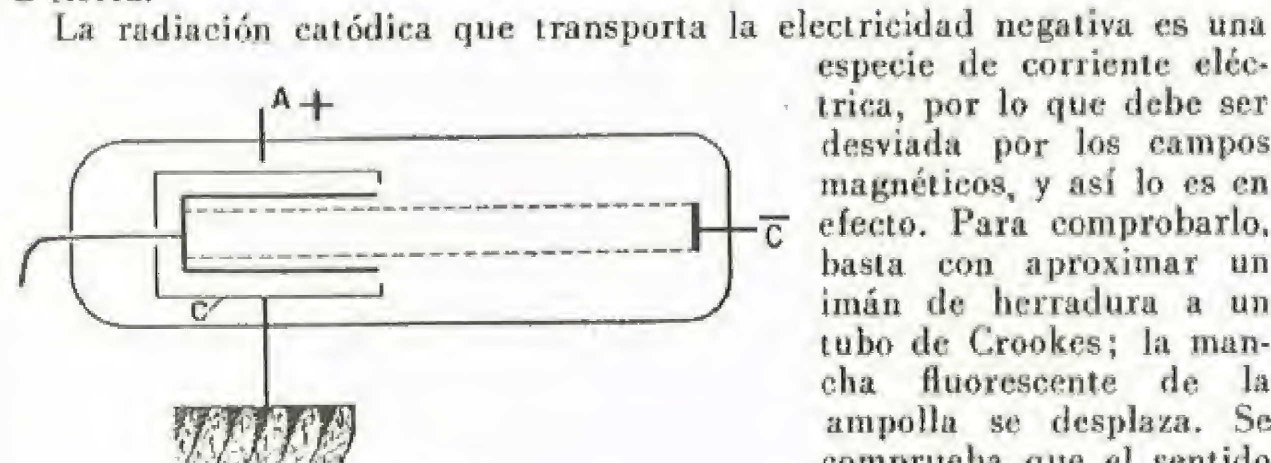


Fig. 532

La desviación de los haces catódicos por los campos eléctricos y magnéticos se utiliza en los oscilógrafos catódicos y en los receptores de televisión. En los oscilógrafos, el campo magnético o el campo eléctrico es producido por una corriente variable que se estudiará más adelante. El haz catódico sigue en sus desplazamientos todas las variaciones de la corriente y, prácticamente, sin inercia. Los desplazamientos del haz pueden ser registrados en una placa fotográfica u observados en una pantalla fluorescente. En los receptores de televisión se tiene un verdadero oscilógrafo que analiza la corriente variable emitida por la estación emisora y recibida y amplificada por el receptor. La pantalla de estos aparatos es la parte del tubo opuesta al cátodo y está provista de una substancia que se hace fluorescente por acción de los rayos catódicos.

Rayos de Lenard. — Ha sido posible sacar los rayos catódicos del tubo donde son producidos y hacer que atraviesen una lámina delgada de aluminio de unas pocas micras de espesor. Se les da entonces el nombre de *rayos de Lenard.* En el aire, su trayecto es muy corto a causa de los choques con las moléculas gaseosas, y producen una iluminación y ozono. Si los rayos de Lenard atraviesan gases rarificados, su trayecto es tanto mayor cuanto mayor es el grado de rarificación.

Estudio del electrón

Corriente de convección. Experiencia de Rowland. — En 1876, **Rowland** mostró que una carga eléctrica móvil creaba un campo magnético. Para ello midió el campo magnético producido en un punto del eje de un disco conductor electrizado que giraba a gran velocidad (*fig.* 533). Este campo era idéntico al que habrían creado corrientes circulares que recorrieran el disco en su sentido de rotación cuando su carga fuera positiva, y en sentido contrario cuando su carga fuera negativa. Se ha denominado *corriente de convección* a la producida por el desplazamiento de un conductor electrizado, por oposición a las *corrientes de conducción* ordinarias que recorren los conductores.

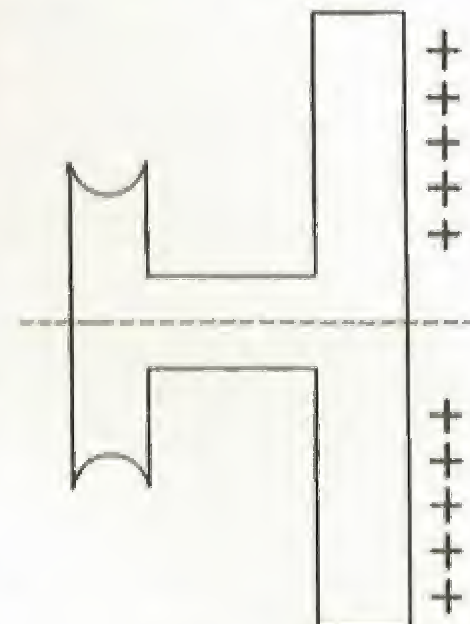


Fig. 533

Aplicación de las leyes del electromagnetismo a las corrientes de convección. — De acuerdo con la experiencia de Rowland, la corriente de convección producida por una carga móvil puede asimilarse a una corriente de conducción, pero la dificultad se presenta al tratar de aplicar las leyes del electromagnetismo a este tipo de corriente. La primera dificultad obedece a que una corriente de convección no es necesariamente cerrada como la corriente de conducción, y, por consiguiente, no puede hablarse de flujo a través de dicha corriente. La segunda procede de que los fenómenos no son estáticos, sino que varían a cada instante con la posición de la carga. Estas dificultades han sido resueltas, y el cálculo muestra que:

1º El campo que produce una carga en un punto M, cuando se desplaza con velocidad v, es perpendicular al plano definido por dicho punto M y dicha velocidad v, dirigido en el sentido indicado por la regla de Ampère, si la carga es positiva, y en el sentido contrario, si la carga es negativa. Su valor en unidades electromagnéticas C.G.S. es

$$H = \frac{ev \text{ sen } \alpha}{r^2},$$

en donde r es la distancia de la carga al punto M y α el ángulo de la velocidad con la recta que une el punto M a la carga (*fig.* 534);

2º La fuerza que ejerce un campo magnético H sobre una carga eléctrica e que se desplaza con la velocidad v, es perpendicular al plano definido por el campo y la velocidad, y está dirigida en el sentido indicado por la regla de Ampère, si la carga es positiva, y en el sentido contrario, si la carga es negativa. Su valor en unidades C.G.S. es

$$F = Hev \text{ sen } \alpha,$$

en donde α es el ángulo que forman el campo y la velocidad.

Obsérvese que estas leyes se deducen de las de Laplace (v. pág. 131) relativas a las corrientes de conducción, reemplazando el producto idl de la intensidad por la longitud del elemento de corriente por la cantidad ev.

Fig. 534

Aplicaremos estos resultados a las corrientes de conducción producidas por las partículas electrizadas que constituyen los rayos catódicos. Utilizaremos, para mayor sencillez en las fórmulas, las unidades electromagnéticas C.G.S.

Acción de un campo eléctrico uniforme sobre una partícula electrizada en movimiento. — Una partícula electrizada que lleva una carga e y se desplaza en un campo eléctrico uniforme E está sometida a una fuerza constante $F = E \times e$, y describe una parábola cuyo eje es paralelo al campo E. Esta experiencia se ha

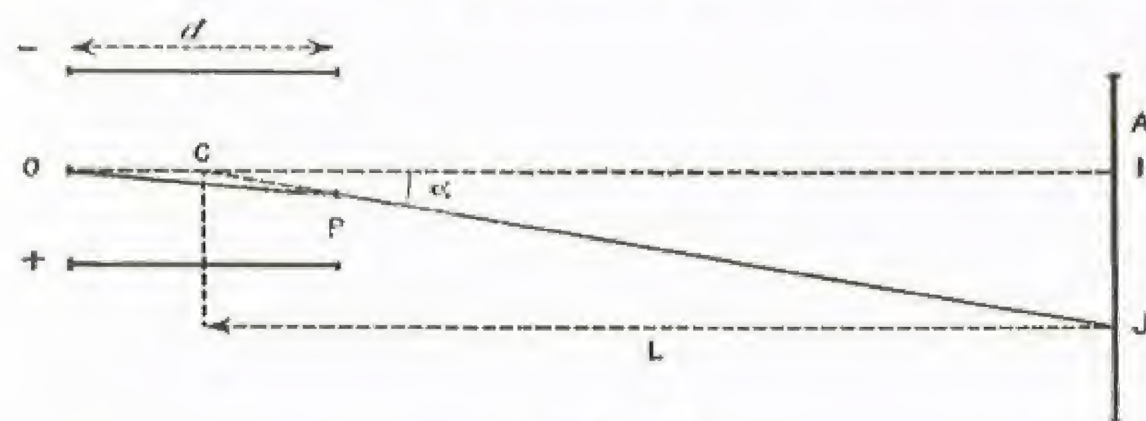


Fig. 535

realizado haciendo pasar un haz de rayos catódicos entre las armaduras de un condensador plano. Reanudemos el estudio de este fenómeno. Cuando el condensador no está cargado, el haz incide sobre una pantalla A, colocada a la distancia L del punto medio del condensador, en un punto I (*fig.* 535). Cuando el condensador está cargado, cada partícula es desviada y el haz incide sobre la pantalla en J. Si se supone que en el exterior del condensador no existe campo eléctrico, una partícula electrizada describirá una rama de parábola OP, y después la tangente PJ en P a esta parábola. En estas condiciones, se obtiene por el cálculo

$$IJ = \frac{1}{v^2} \times \frac{e}{m} \times E \times d \times L,$$

donde v es la velocidad de una partícula, e su carga, m su masa, E el campo eléctrico, d la longitud de las armaduras y L la distancia de la pantalla al centro C del condensador.

En esta fórmula se pueden medir IJ, E, d y D; obtendremos, pues, $\frac{1}{v^2} \times \frac{e}{m}$; la medida de la desviación magnética nos permitirá calcular la cantidad $\frac{1}{v} \cdot \frac{e}{m}$, y combinando estas dos cantidades se obtendrá la velocidad v y la relación $\frac{e}{m}$.

Acción de un campo magnético uniforme sobre una partícula electrizada. — Una partícula de carga e que se desplaza a la velocidad v en un campo magnético uniforme H está sometida a una fuerza

$$F = Hev \text{ sen } \alpha$$

cuyos sentido y dirección ya se han precisado. Supongamos que la partícula se mueve normalmente al campo; la velocidad v, el campo y la fuerza formarán entonces un triedro trirrectángulo (*fig.* 536). Sean Ox, y, z el triedro inicial, es decir, el que corresponde al punto O a partir del cual la partícula entra en el campo magnético; como la velocidad y la fuerza se encuentran en el plano zOy, la partícula permanecerá constantemente en este plano, y el cálculo muestra que describe un círculo.

Fig. 536

Al efectuar esta experiencia sobre un haz de rayos catódicos, se hará actuar el campo sólo sobre una porción de la trayectoria del haz, y cada partícula describirá un arco de círculo, y después la tangente; se observará una desviación I'J' (*fig.* 537), que según el cálculo valdrá $I'J' = \frac{1}{v} \cdot \frac{e}{m} \cdot HdL$, donde d es la longitud sobre la cual actúa el campo H, y L la distancia de la pantalla al punto medio C de la longitud sobre la cual actúa el campo.

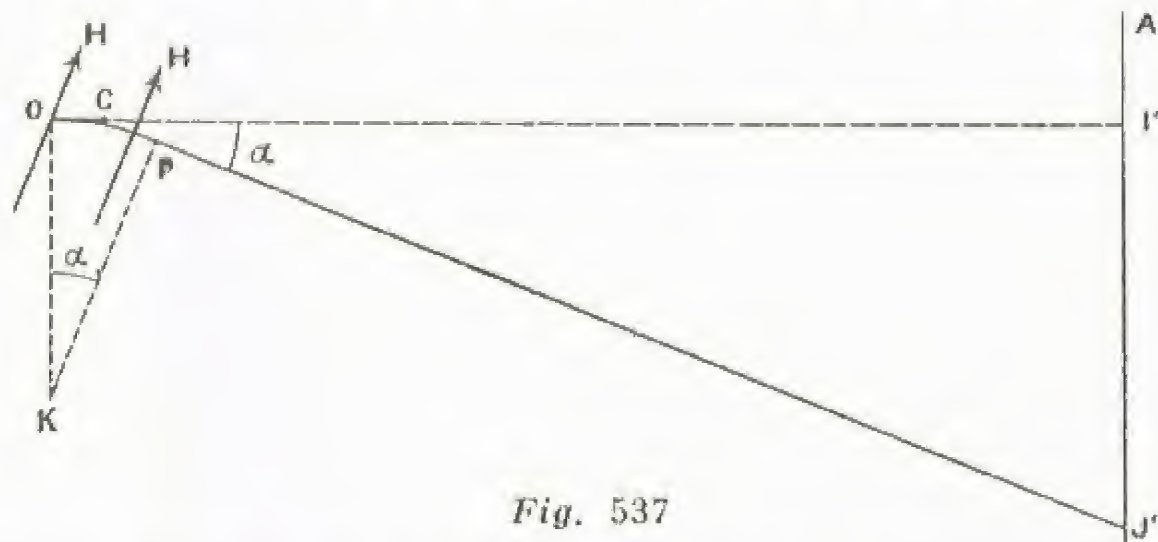


Fig. 537

El ángulo α que se ha desviado la partícula es igual al ángulo de los radios KO y KP, y se tendrá

$$\alpha = \frac{\overset{\frown}{OP}}{\rho},$$

en donde ρ es el radio del círculo. Pero si el arco OP es pequeño, podrá tomársele igual a d, de donde

$$\alpha = \frac{d}{\rho}, \text{ y como } \rho = \frac{mv}{eH},$$

$$I'J' = L \times \alpha = \frac{1}{v} \frac{e}{m} HdL.$$

En esta fórmula pueden medirse I'J', H, d, L y se obtendrá, por consiguiente, la cantidad $\frac{1}{v} \frac{e}{m}$.

Resultados de las medidas. — En la práctica se hace que actúen simultáneamente un campo eléctrico uniforme y un campo magnético uniforme sobre un haz estrecho de rayos catódicos; se hacen coincidir las direcciones de ambos campos, de forma que las desviaciones que de ello resulten sean rectangulares (*fig.* 538). En la primera experiencia se suprimen los dos campos, y el haz encuentra la pantalla en O; después se crea el campo eléctrico únicamente, y se logra el punto A; a continuación el campo magnético únicamente, lo que da el punto B, y por último ambos campos, y se obtiene el punto C (*fig.* 539).

Como las partículas no tienen todas la misma velocidad, existen varios puntos A, varios puntos B y varios puntos C. Los puntos AA', etc., están todos situados sobre una recta Oy, los puntos B sobre una recta Ox, y las medidas de las abscisas y de las ordenadas de los puntos C darán, respectivamente, las cantidades $\frac{1}{v} \frac{e}{m} HdL$ y $\frac{1}{v^2} \frac{e}{m} EdL$, de donde se obtendrán la velocidad v y la relación $\frac{e}{m}$. Haciendo

Fig. 538

$$a = \frac{1}{v} \frac{e}{m} \quad \text{y} \quad b = \frac{1}{v^2} \frac{e}{m},$$

se tendrá

$$v = \frac{a}{b}, \qquad \frac{e}{m} = \frac{a^2}{b}.$$

Los resultados de las medidas son los siguientes:

La velocidad v varía con la diferencia de potencial y la partícula considerada, habiéndose obtenido velocidades comprendidas entre 20 000 y 200 000 kilómetros por segundo.

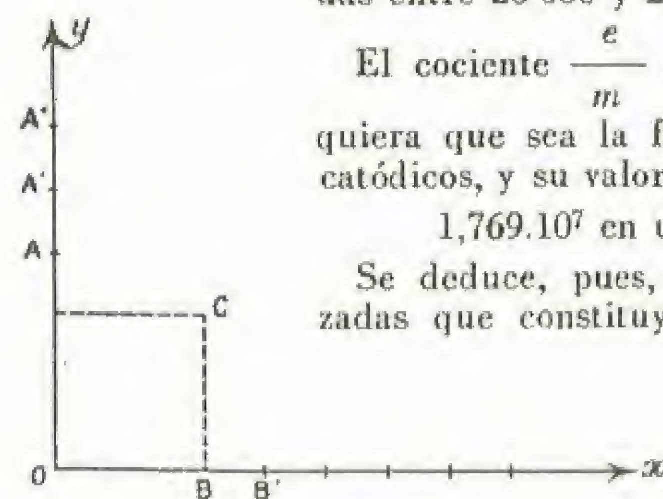


Fig. 539

El cociente $\frac{e}{m}$ es absolutamente constante, cualquiera que sea la forma de producción de los rayos catódicos, y su valor es

$$1{,}769.10^7 \text{ en unidades electromagnéticas.}$$

Se deduce, pues, que todas las partículas electrizadas que constituyen los rayos catódicos son idénticas, y se las ha denominado *electrones.*

Carga del electrón. — Se supone actualmente que, lo mismo que la materia está constituida por átomos, *la electricidad está formada por cargas elementales indivisibles, y que una cantidad cualquiera de electricidad es igual a un número entero de veces la carga elemental.* También se supone que *esta carga elemental es la carga de un ion electrolítico.*

Esta carga ya se ha calculado (v. p. 127) a partir del número de Avogadro $N = 6{,}0 \cdot 10^{23}$, y se encontró igual a

$$e = 1{,}60 \cdot 10^{-19} \text{ culombios,}$$

o

$$e = 1{,}60 \cdot 10^{-20} \text{ u.e.m.}$$

Se admite que la carga del electrón es igual a la carga elemental. El conocimiento del valor de la carga elemental es de gran importancia; el que se deduce de las experiencias electrolíticas dista mucho de ser exacto, a causa de la incertidumbre que reina con respecto al número de Avogadro, que sólo es conocido con un 10 por 100 de aproximación. Por esta razón Millikan ha efectuado experiencias muy precisas para medir la carga elemental.

Experiencia de Millikan. — Millikan observó la caída en un campo eléctrico de las gotas microscópicas de un líquido no volátil (*fig.* 540). La gota está siempre cargada a causa de los frotamientos necesarios para su formación. Sean e su carga, p su peso y E el campo eléctrico. Si el campo y el peso actúan en sentido contrario, la gota microscópica considerada está sometida a una fuerza f igual a



Fig. 540

$$f = p - Ee.$$

La velocidad de caída que adquiere, v, es proporcional a f, o sea

$$v = kf.$$

En ausencia de campo eléctrico, la gota cae con una velocidad v_0: $v_0 = kf_0$, siendo f_0 igual a p.

Se tendrá, pues, $\frac{v}{v_0} = \frac{f}{f_0} = \frac{p - Ee}{p} = 1 - \frac{Ee}{p}$.

Como m es la masa de la gota y $p = mg$, se tendrá

$$\frac{e}{m} = \frac{g}{E}\left(1 - \frac{v}{v_0}\right).$$

La masa m de la gota se deduce de su radio, que se calcula a su vez a partir de la velocidad de caída v_0. Millares de experiencias han conducido a la siguiente conclusión:

La carga e de una gota es siempre un número entero de veces la carga elemental, y el conjunto de experiencia ha conducido a que se atribuya a la carga elemental el valor

$$e = 1{,}60 \cdot 10^{-19} \text{ culombios,}$$

o

$$e = 1{,}60 \cdot 10^{-20} \text{ u.e.m.}$$

Masa y radio del electrón. — Si se admite que la carga del electrón es la carga elemental, se obtendrá para su masa la cantidad

$m = \frac{1,591 \cdot 10^{-20}}{1,77 \cdot 10^{7}} = 0,9 \cdot 10^{-27}$ gramos. Esta masa es la $\frac{1}{1\,840}$ parte de la masa de un átomo de hidrógeno, cantidad, como se ve, pequeñísima.

Como valor de la energía electromagnética de un electrón de velocidad v, se ha obtenido

$$W = \frac{1}{2} m_0 v^2,$$

donde m_0 es igual a $\frac{2e^2}{3a}$, e la carga y a el radio del electrón. La fórmula que expresa la energía electromagnética es análoga a la de la energía cinética de un cuerpo de masa m_0 y velocidad v; se admite, pues, en la actualidad, que la inercia de un electrón es completamente de origen electromagnético y que, por consiguiente, m_0 es la masa del electrón. De ello se deduce el radio a del electrón:

$$a = 1,9 \cdot 10^{-13} \text{ cm}.$$

Energía del electrón. — La energía cinética de un electrón puede expresarse con las unidades habituales, es decir, en ergios, en el sistema C.G.S. No obstante, como se verá más adelante, para obtener en la práctica electrones de grandes velocidades se les somete a la acción de un campo eléctrico expresado en voltios por centímetro, por lo que se ha adoptado la costumbre de utilizar como unidad de energía para el electrón, así como para todas las partículas electrizadas, el electrón-voltio, que se define como la energía que adquiere un electrón sometido a una diferencia de potencial de 1 voltio. El electrón-voltio vale $1,6 \cdot 10^{-12}$ ergios.

Variación de la masa con la velocidad. — Los cálculos anteriores no son rigurosos, porque se supone en ellos que el campo magnético producido por el electrón en movimiento no es deformado por el propio movimiento, lo que sólo es válido si la velocidad del electrón es pequeña con respecto a la de propagación del campo magnético, es decir, de la luz. El cálculo exacto, ya efectuado, conduce a atribuir al electrón una masa que varía con la velocidad, y que para una velocidad igual a la de la luz llega a valer infinito, lo que equivale a decir que esta última es una velocidad inaccesible, aunque puede llegarse a un valor muy aproximado. Para una diferencia de potencial de 5 millones de voltios, la velocidad de un electrón alcanzaría las 995 milésimas de la velocidad de la luz en el vacío. Para una velocidad de 999 milésimas de la de la luz, la masa del electrón es igual a doscientas veces la de un electrón en reposo.

Es posible comunicar a un electrón una velocidad v superior a la de la luz C en un medio material. La propagación de un haz de estos electrones en el medio va acompañada de la producción de un cono luminoso, cuyo eje es el del haz de electrones y cuyo ángulo en el vértice, α, viene expresado por la fórmula

$$\alpha = \frac{C}{V} \text{ (efecto Cerenkov).}$$

La mecánica ondulatoria (v. p. 173) introduce también ciertas modificaciones en los cálculos anteriores.

Cuando se exponga la teoría de la relatividad veremos que la variación de la masa con la velocidad se hace extensiva a todos los cuerpos.

Fenómeno termoiónico

Emisión de electrones por efecto del calor. — En 1901, **Richardson** mostró que un cuerpo incandescente emitía partículas electrizadas negativamente. **Dushman,** en 1914, obtuvo para la relación $\frac{e}{m}$ de estas partículas el valor $1,76.10^7$, lo que las identifica perfectamente con los electrones.

En el aire, estos electrones son rápidamente detenidos a causa de los choques con las moléculas gaseosas, por lo cual estudiaremos el fenómeno en el vacío. Para ello, colocaremos dentro de una ampolla de vidrio, absolutamente exenta de gas, un filamento F (*fig.* 541) y una placa P. El filamento se pondrá incandescente por una corriente eléctrica. Si la placa está aislada y es neutra, los electrones se apartan poco del filamento, pero cuando se establece una diferencia de potencial entre el filamento y la placa por medio de una batería B, de forma que el potencial de la placa sea el mayor, los electrones son atraídos por la placa, comprobándose, por medio de una galvanómetro G, el paso de una corriente. Los electrones, al llegar a la placa, neutralizan en cada instante una parte de la electricidad positiva de la misma, y la batería B suministra a la placa la electricidad que ésta pierde, y que constituye la corriente placa-filamento.

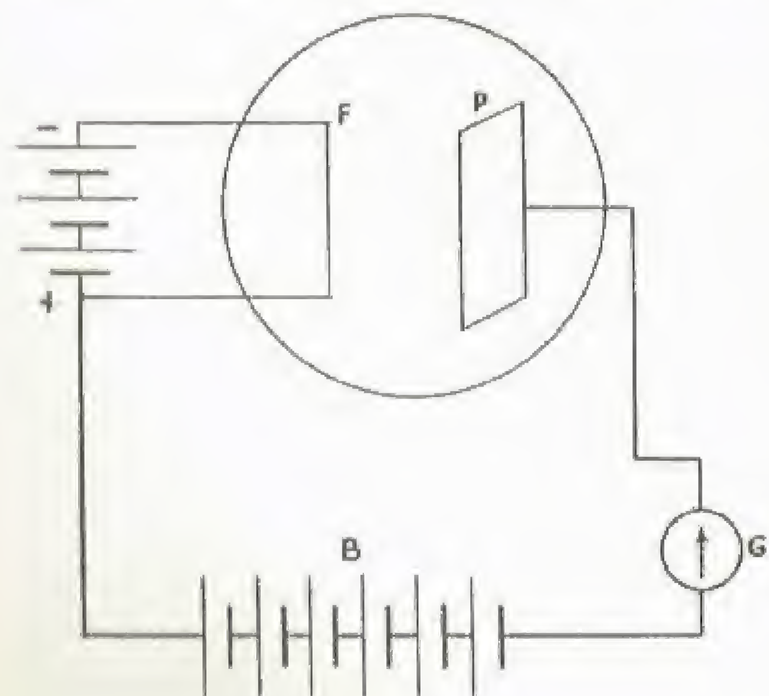


Fig. 541

Para una diferencia de potencial dada, la corriente es tanto más intensa cuanto más elevada es la temperatura del filamento.

Para una temperatura dada del filamento, la corriente aumenta cuando aumenta la diferencia de potencial, haciéndose constante a partir de cierto valor de la diferencia de potencial. Este fenómeno es representado por la curva de la figura 542, en donde figuran en abscisas las diferencias de potencial filamento-placa, y en ordenadas las intensidades de corriente. La corriente máxima que puede obtenerse para una temperatura dada del filamento se llama *corriente de saturación*, y corresponde a diferencias de potencial tales que todos los electrones emitidos por el filamento sean captados por la placa.



Fig. 542

Energía cinética de los electrones. — Cuando un electrón pasa del filamento a la placa, adquiere la energía eV, siendo e su carga y V la diferencia de potencial; esta energía aparece en forma de energía cinética $\frac{1}{2} mv^2$, y se tendrá

$$\frac{1}{2} mv^2 = eV,$$

de donde

$$v^2 = \frac{2e}{m} V,$$

lo que para una diferencia de potencial de 80 voltios (u 8.10^9 u.e.m.), da una velocidad de 5 000 kilómetros por segundo. Esta energía cinética es absorbida por la placa que, por consiguiente, se calienta, por lo cual se escogen placas gruesas.

La fórmula $\frac{1}{2} mv^2 = eV$ es aplicable a los electrones de rayos catódicos, y da el valor máximo que puede alcanzar un electrón para una diferencia de potencial dada: valor máximo, porque los electrones pueden sufrir choques que disminuyen su velocidad; estos choques se producen cuando el electrón procede del interior del cátodo, en el caso de los rayos catódicos. La medida de la velocidad de los electrones ha permitido verificar con precisión la fórmula $\frac{1}{2} mv^2 = eV$.

Teoría del fenómeno termoiónico. — Para extraer un electrón del filamento hay que efectuar un trabajo W, que corresponde a las fuerzas de atracción ejercidas sobre el electrón por los núcleos de los átomos. Debido a la agitación térmica, los electrones poseen cierta energía cinética w. Sólo saldrán los electrones tales que

$$w > W.$$

Aplicando un cálculo análogo al de la teoría cinética de los gases se puede evaluar la proporción de electrones que a una temperatura T tienen una energía superior a W. El número de electrones "salientes" aumenta más rápidamente que el cuadrado de la temperatura absoluta.

Aplicaciones del fenómeno termoiónico. — El fenómeno termoiónico, es decir, la emisión de electrones por los cuerpos incandescentes, ha sido objeto de aplicaciones. La más importante es la *lámpara de tres electrodos* de Lee De Forest, que se estudiará con más detención en el capítulo de la telegrafía sin hilos. Estudiaremos ahora la *lámpara-válvula* y los *tubos Coolidge* de rayos catódicos.

El objeto de la lámpara-válvula es rectificar las corrientes alternas, y su principio es el mismo que el del aparato que nos ha permitido estudiar el fenómeno termoiónico; una lámpara-válvula consta, pues, de placa y filamento. Si se establece entre ambos una diferencia de potencial alterna, la corriente no pasa más que cuando la placa es positiva, y por consiguiente se rectifica la corriente. Actualmente se construyen lámparas-válvulas que pueden rectificar una potencia de 70 kilovatios bajo la tensión de varios millares de voltios, siendo entonces necesario refrigerar la placa por una corriente de agua.

Los tubos Coolidge son tubos de Crookes en los que el cátodo está incandescente; si se establece entonces una diferencia de potencial de 200 000 a 300 000 voltios, los electrones adquieren velocidades enormes, del orden de 250 000 kilómetros por segundo.

Rayos positivos. El átomo

Producción. — En 1886, **Goldstein** descubrió los *rayos positivos*. Los obtuvo utilizando en un tubo de Crookes un cátodo en el que se habían practicado orificios; los rayos positivos pasan a través de los orificios y se propagan detrás del cátodo, es decir, en sentido inverso de los rayos catódicos (*fig.* 543). Los rayos positivos excitan la fluorescencia de cierto número de cuerpos, de la willemita en particular, e impresionan las placas fotográficas.

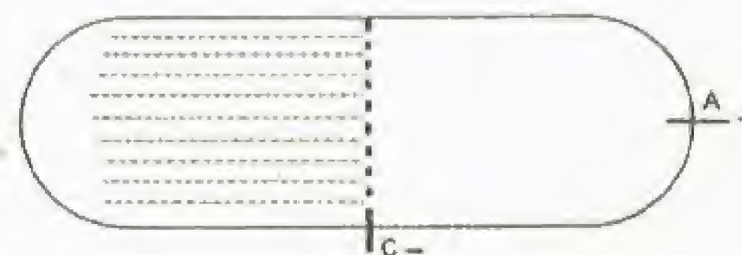


Fig. 543

Se obtienen radiaciones positivas más intensas utilizando un ánodo puntiagudo e incandescente, y reduciendo la presión en el interior de la ampolla a menos de $\frac{1}{1\,000}$ de milímetro de mercurio. En estas condi-

ciones, no se establece radiación catódica alguna (presión demasiado baja), comprobándose, en cambio, una *radiación anódica* que se propaga en línea recta a partir del ánodo.

Naturaleza de los rayos positivos. — Los rayos positivos son desviados por los campos magnéticos y eléctricos, y poseen una energía cinética y una carga eléctrica positiva. Por ello se ha llegado a la conclusión de que los rayos positivos están constituidos por partículas electrizadas positivamente. Ha sido posible, como para el electrón, medir las velocidades v y las relaciones $\frac{e}{m}$ relativas a estas partículas.

Los resultados fueron los siguientes:

Las velocidades de las partículas positivas son mucho más pequeñas que las de los rayos catódicos, y varían entre 1 000 y 10 000 kilómetros por segundo;

La relación $\frac{e}{m}$ es también mucho más pequeña, y esencialmente variable con la naturaleza del gas que contiene el tubo de Crookes o con la naturaleza del ánodo, si se trata de una radiación anódica. Se comprueba incluso que para una radiación positiva dada no todas las partículas tienen la misma relación $\frac{e}{m}$.

Para explicar estos resultados, se ha admitido que los rayos positivos están constituidos por átomos o por grupos de átomos electrizados, siendo la carga eléctrica igual a un número entero de veces, generalmente pequeño, la carga elemental. La diferencia de la partícula positiva con el electrón es considerable, ya que este último es un "grano" de electricidad negativa sin soporte material; en cambio, la carga positiva elemental implica un soporte material.

Partiendo de estas hipótesis, se ha podido determinar que los valores de $\frac{e}{m}$ encontrados para los rayos positivos del oxígeno correspondían a partículas simbolizadas por

$$O+,\ O_2+,\ O_3+,\ O++,$$

lo que significa que estas partículas están constituidas por uno (O+), dos (O_2) o tres (O_3) átomos de oxígeno que llevan una (O+, O_2+, etc.) o dos (O++) cargas elementales.

Se observa que estas partículas ofrecen una gran analogía con los iones electrolíticos, y en lo sucesivo las denominaremos iones.

Los iones más ligeros que se conocen tienen una masa sensiblemente igual a la del átomo de hidrógeno, y su carga es siempre igual y de signo contrario a la del electrón. Estos iones, que se consideran como constituyentes universales de la materia, se denominan protones.

Espectrógrafo de masas. Isótopos. — Consideremos iones positivos de velocidades diferentes y de relación $\frac{e}{m}$ también diferente. Hagamos, como con el electrón,

$$a = \frac{1}{v}\,\frac{e}{m}, \qquad b = \frac{1}{v^2}\,\frac{e}{m};$$

a es medida por la desviación magnética y b por la desviación eléctrica. Si hacemos actuar simultáneamente los dos campos eléctrico y magnético, de forma que las desviaciones sean rectangulares (v. p. 152), las cantidades a y b son proporcionales a las coordenadas de los puntos de impacto de los rayos positivos sobre la placa fotográfica. Las coordenadas son, en efecto:

$$I'J' = \frac{1}{v}\cdot\frac{e}{m}\,HdL = a\cdot HdL;$$

$$IJ = \frac{1}{v^2}\,\frac{e}{m}\,EdL = b\cdot EdL.$$

Se tendrá $\frac{e}{m} = \frac{a^2}{b}$, siendo la ecuación del lugar de los puntos de impacto de los iones que tienen la misma relación $\frac{e}{m}$

$$\frac{a^2}{b} = k, \quad \text{o} \quad a^2 = kb.$$

Este lugar es una parábola de eje Ob (*fig.* 544) y de parámetro $\frac{k}{2}$.

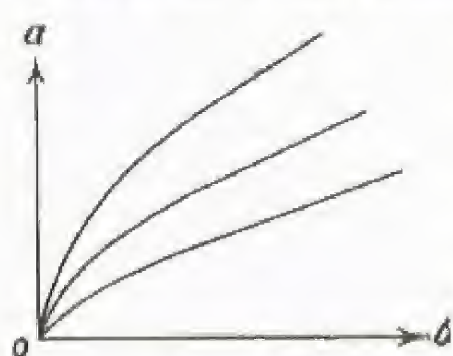


Fig. 544

Si en la radiación hay iones con valores de la relación $\frac{e}{m}$ diferentes se obtendrán arcos de parábolas diferentes, y la medida de los parámetros dará los valores de las relaciones $\frac{e}{m}$.

e es un múltiplo entero sencillo de la carga elemental, m es proporcional a la masa atómica del elemento; por consiguiente, la relación de los valores de $\frac{e}{m}$, que correspondan a dos iones de naturaleza química diferente, medirá, con un error de un número entero, la relación de las masas atómicas de los elementos que constituyen los iones. Se obtiene así un medio físico para medir las masas atómicas. Los resultados obtenidos son muy importantes, ya que han mostrado que ciertos cuerpos simples se conducían como una mezcla de dos cuerpos de masas atómicas diferentes. El cloro, por ejemplo, de masa atómica 35,46, da dos parábolas distintas para el ion Cl+, parábolas que corresponden a masas atómicas 35 y 37; el mercurio, de masa atómica 200,6, se conduce como una mezcla de elementos cuyas masas atómicas serían 197, 198, 199, 200, 202, 204.

Se admite que el cloro, el mercurio, etc., son mezclas de elementos de masas atómicas diferentes, a los que se denomina *isótopos. Los isótopos tienen propiedades químicas idénticas,* no pudiendo separarse por ninguna reacción, de forma que una mezcla de isótopos conserva una composición constante, lo que explica que todas las muestras de cloro natural tengan una masa atómica igual a 35,46.

Los aparatos debidos a **J. J. Thomson** y a **Aston,** que permiten separar los isótopos mediante las desviaciones eléctricas y magnéticas, se denominan *espectrógrafos de masas;* estos espectrógrafos dan, en efecto, sobre la placa fotográfica, líneas que corresponden a masas atómicas diferentes, de la misma forma que un prisma da sobre una pantalla líneas luminosas que corresponden a diferentes longitudes de onda.

La separación de los isótopos no puede intentarse por vía química, pudiendo efectuarse por vía física si las propiedades que intervienen dependen de la masa de los átomos; esto es lo que sucede en el espectrógrafo de masa.

Este último se ha utilizado industrialmente, si así puede decirse, para la separación de cantidades importantes de los isótopos 235 y 238 del uranio, destinado el primero de ellos a la fabricación de la bomba llamada "atómica". El electroimán de este enorme espectrógrafo de masa pesa 4.000 toneladas. También se ha intentado separar isótopos por medios más sencillos.

La densidad es una constante física que depende de la masa de los átomos, y la velocidad de difusión de un gas a través de una pequeña abertura depende de la densidad; por ello, se ha tratado de separar los isótopos del cloro haciendo que este gas se difunda a través de un orificio pequeño (*fig.* 545). Los resultados de estas experiencias fueron la obtención de un cloro cuya masa atómica era 35,494 y de otro cloro de masa atómica 35,514.

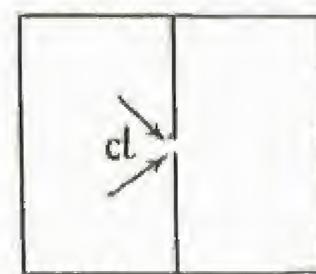
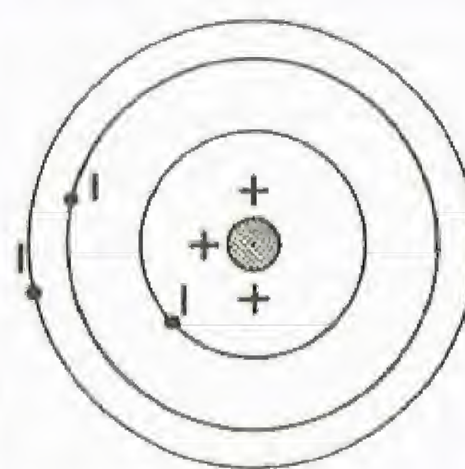


Fig. 545

La existencia de los isótopos ha quedado, por consiguiente, claramente confirmada. No todos los elementos están constituidos por mezclas de isótopos: el nitrógeno (N = 14) y el helio (He = 4) no han podido desdoblarse. Es notable que sean estos elementos precisamente aquellos cuya masa atómica es igual a un número entero; ello conduce a pensar que todos los elementos tienen masas atómicas iguales a un número entero y que las excepciones aparentes se deben al hecho de que la mayoría de los cuerpos simples son mezclas de isótopos.

El átomo. — Hasta ahora hemos visto cómo el electrón es siempre idéntico a sí mismo cualquiera que sea la naturaleza del filamento en el efecto termoiónico, y cualquiera que sea la naturaleza del cátodo en la radiación catódica: *el electrón puede, por consiguiente, considerarse como un constituyente universal de la materia.* Se admite actualmente que el átomo está formado por un núcleo cargado positivamente, alrededor del cual giran, como los planetas alrededor del Sol, electrones (*fig.* 546). Al ser idénticos todos los electrones, los átomos sólo difieren por la naturaleza del núcleo y por el número de electrones libres. La carga del núcleo es, evidentemente, igual a la carga total de los electrones, de forma que el átomo es eléctricamente neutro. Si el átomo pierde un electrón, se convierte en un ion con una carga elemental positiva. Como la masa de un electrón es siempre inferior a la milésima parte de la masa del átomo, se comprende que la masa del ion positivo sea prácticamente la del átomo, pero el átomo puede captar un electrón en lugar de perderlo, y entonces se convierte en un ion negativo. Se conocen efectivamente tales iones, muy diferentes de los electrones por su masa.


Fig. 546

El más sencillo de todos los átomos es el átomo de hidrógeno, cuyo núcleo consta de un protón, alrededor del cual gira un electrón.

Otras partículas eléctricas

El electrón positivo o positón. — El americano Anderson observó, estudiando la radiación cósmica con una cámara de Wilson, trayectorias completamente análogas a las de los electrones, pero que eran desviadas por el campo magnético en sentido inverso, como si se tratara de un electrón con una carga positiva. Las mediciones hechas confirmaron que se trataba, en efecto, de un electrón positivo. Se descubrió después que estos electrones positivos, o positones, podían producirse por acción de la radiación γ (v. p. 162). Se observó incluso la producción simultánea de un electrón negativo y de un positón por "materialización" de un rayo γ. Veremos más adelante cómo la teoría de la relatividad interpreta este fenómeno.

El positón es muy raro, en comparación con el electrón, ya que es atraído por éste y, por consiguiente, desaparece muy rápidamente. Se ha podido, no obstante, hacer su estudio, que ha dado resultados experimentales que confirman de manera sorprendente la teoría relativista de la transformación posible de la materia en energía, y viceversa.

Los mesones. — El físico japonés Yukawa supuso, basándose en consideraciones teóricas, que existían partículas electrizadas de masas intermedias entre el electrón y el protón; de ahí el nombre de mesones con que las designó. Los mesones fueron descubiertos en la radiación cósmica, y se produjeron después artificialmente bombardeando la materia con partículas de gran energía. Se conocen con certeza dos clases de mesones, los mesones π, cuya masa vale 320 veces la de un electrón y cuya carga puede ser positiva o negativa, y los mesones μ, cuya masa es 214 veces la del electrón, con una carga que también puede ser positiva o negativa. Existen, al parecer, otros mesones (mesones τ y mesones ν), pero su existencia no está absolutamente confirmada. Los mesones tienen una existencia muy breve, unas cienmilésimas de segundo, y desaparecen a causa de sus choques con los átomos.

Aceleradores de partículas electrizadas Estudio de las trayectorias

Para permitir el estudio del núcleo del átomo, los físicos necesitan partículas electrizadas de gran energía, que, al actuar sobre él, lo desintegren, y pongan así de manifiesto sus elementos. Los aparatos imaginados para acelerar las partículas electrizadas utilizan la acción de los campos eléctricos o de los campos magnéticos.

Ciclotrón. — Es un aparato en el que las partículas son aceleradas por un campo eléctrico, pero para que sus dimensiones no sean demasiado grandes, se "arrollan" las trayectorias en hélice por la acción de un campo magnético. El principio esencial es el siguiente: la circunferencia que describe una partícula electrizada bajo la acción de un campo magnético tiene un radio que depende de la velocidad de la partícula, de su masa, de su carga y de la intensidad del campo. Si varía únicamente la velocidad, el radio de la circunferencia descrita varía en forma tal que el tiempo que tarda una partícula en describir la circunferencia permanece constante. En estas condiciones, un ciclotrón consta de dos electrodos semicilíndricos, que aparecen en corte en el esquema (*fig.* 547). La diferencia de potencial creada entre los electrodos es alterna. El campo magnético es perpendicular al plano de la figura. Supongamos que una partícula electrizada negativamente aborda el electrodo I cuando éste es positivo: la partícula será acelerada, describirá una semicircunferencia y se presentará en el campo del segundo electrodo al cabo de un tiempo $\frac{t}{2}$, si t es el tiempo necesario para que la partícula recorra una circunferencia completa. Si al cabo de un cierto tiempo $\frac{t}{2}$, la diferencia de potencial entre los electrodos ha cambiado de sentido, la partícula será de nuevo acelerada y describirá una circunferencia de radio mayor, pero siempre en el mismo tiempo t, y por consiguiente abordará nuevamente el electrodo I cuando éste esté a un potencial positivo, siendo de nuevo acelerada, etc. En principio, podría obtenerse una aceleración indefinida, pero en la práctica el campo magnético no puede ser absolutamente constante desde el centro a la periferia, sino que va disminuyendo: los radios de los círculos descritos por las partículas van aumentando, así como los tiempos t, y llega un momento en que la partícula alcanza el campo de uno u otro electrodo demasiado tarde para ser acelerada. En los casos de velocidades muy grandes, este hecho es acentuado por el aumento de masa de la partícula, que reduce su velocidad angular.

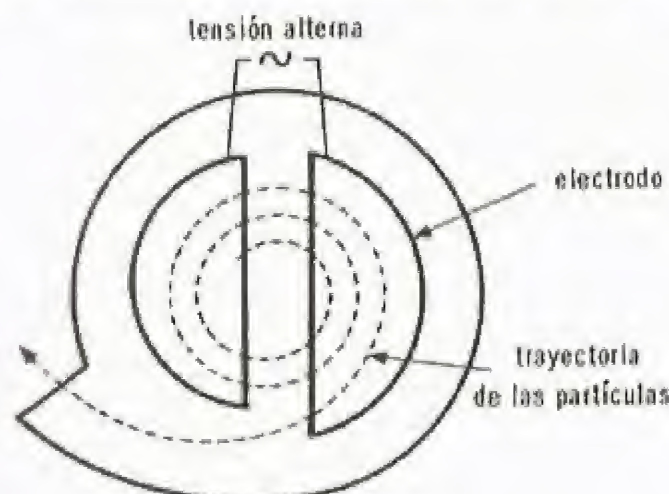
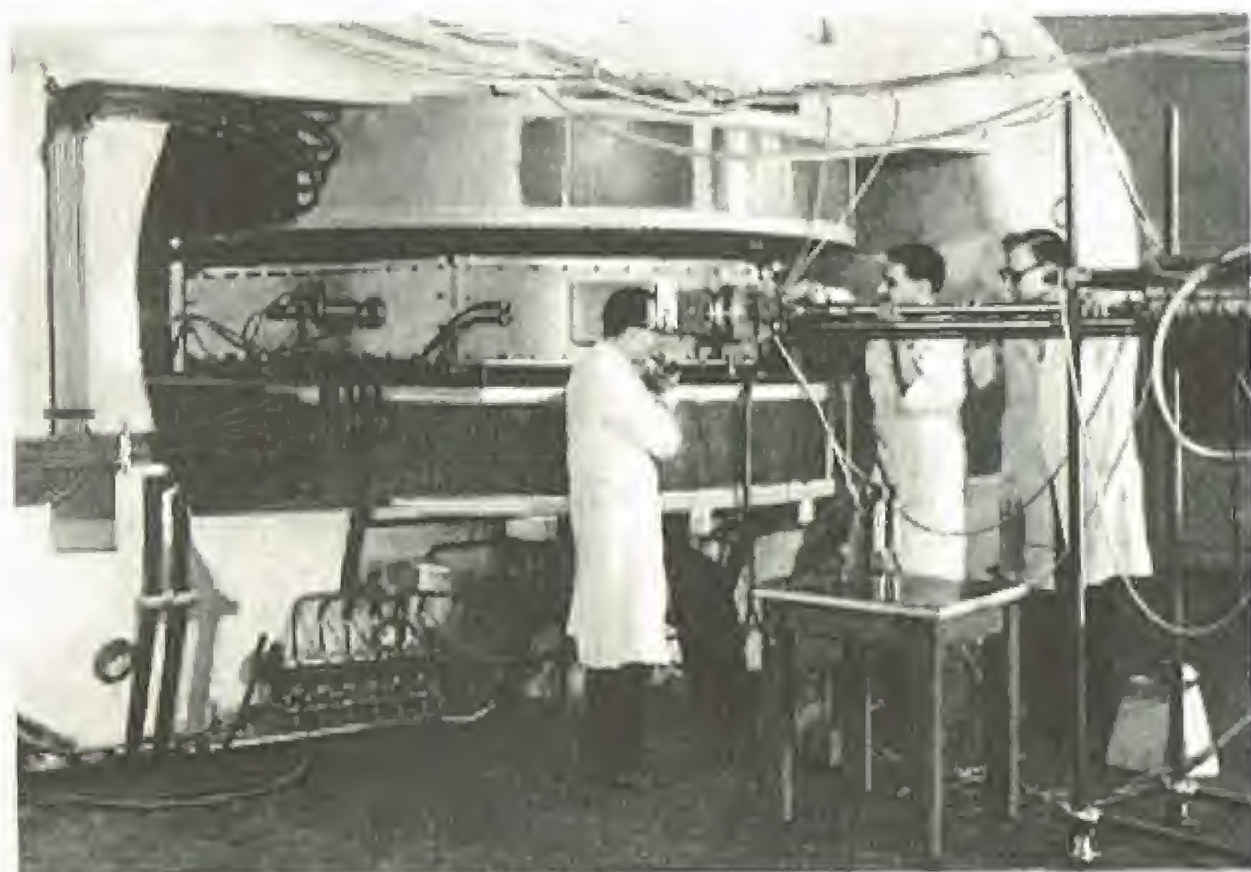


Fig. 547


Ciclotrón de Saclay. Puede verse la caja de aceleración dentro de las piezas polares del electroimán (*Fot. Com. energía atómica*)

El vacío en un ciclotrón debe mantenerse, evidentemente, lo más elevado posible, de forma que se eviten los choques de las partículas con los átomos. Los campos magnéticos utilizados son del orden de 10 a 20 000 gauss, y la tensión aceleratriz es de unas cuantas decenas de millares de voltios. Cada partícula describe un centenar de espiras. De este modo se llegan a obtener partículas con una energía de varios millones de electrones-voltios.

Betatrón. — En este aparato la aceleración es provocada únicamente por la acción de un campo magnético. Para ello, una partícula previamente lanzada llega a una región en donde un campo magnético perpendicular al plano de su trayectoria crece proporcionalmente al tiempo. La partícula describe espiras y es acelerada por la inducción que se crea en esas espiras, como sucede en el secundario de un transformador. En el betatrón de Kerts (Estados Unidos), los electrones dan 150 000 revoluciones, aproximadamente, y adquieren una velocidad de 295 000 km/s y una energía de 20 millones de electrones-voltios.

Las posibilidades del betatrón quedan limitadas por la pérdida de energía debida a la radiación electromagnética de las partículas en movimiento.

Sincrociclotrón. — A causa de la variación del campo magnético desde el centro a los bornes del ciclotrón, las partículas electrizadas ya no están, al cabo de cierto tiempo, en fase con la tensión alterna de los electrodos. Para obviar este inconveniente, se ha ideado disminuir la frecuencia de la tensión aceleratriz cuando las partícuas llegan al final del recorrido. Evidentemente, esto va en detrimento de las partículas que están todavía en fase, de forma que el rendimiento en partículas es bajo, pero las energías obtenidas son considerables: 400 millones de electrones-voltios, con núcleos de helio.

Aceleradores lineales. — Son, teóriamente, los más sencillos: las partículas son aceleradas por un campo eléctrico intenso creado por una diferencia de potencial constante muy elevada, que es producida por una máquina electrostática (un millón de voltios). Las energías obtenidas sobrepasan sólo unas cuantas centenas de millares de electrones-voltios.

Estudio de las trayectorias. — Uno de los medios más preciosos de investigación de la estructura de la materia es el estudio de las trayectorias de las partículas electrizadas. La cámara de Wilson es el aparato que ha proporcionado mejores servicios en este aspecto. Está constituida, en principio, por un recinto cerrado de caras transparentes, en cuyo interior hay vapor de agua sobresaturado. El paso de una partícula electrizada por la cámara hace que cese la sobresaturación, produciéndose a lo largo de la trayectoria de la partícula finas gotas de agua que materializan su trayectoria y que permiten fotografiarla.

La sobresaturación del vapor de agua en la cámara de Wilson se obtiene por medio de una brusca expansión provocada por un pistón.

A la cámara de Wilson puede asociarse un detector de partículas electrizadas, como el contador de Geiger-Müller, a fin de que el funcionamiento de la cámara sólo se desencadene a ciencia cierta.

El contador de Geiger-Müller está constituido, en principio, por un hilo metálico rodeado de un cilindro también metálico. Entre ambos existe una tensión algo inferior a la tensión disruptiva, y el paso de una partícula electrizada entre el hilo y el cilindro provoca una descarga muy breve, que puede hacerse sensible por diversos medios (electrómetro, oscilógrafo, amplificación por triodo, etc.). Esta descarga puede también provocar automáticamente el funcionamiento de la cámara de Wilson. Las partículas electrizadas tienen la propiedad de impresionar la placa fotográfica. Tal partícula, al efectuar un trayecto en una emulsión sensible, dejará en ella la huella de su paso, que será visible una vez revelada la placa. Esta técnica se utiliza muy especialmente para el estudio de los rayos cósmicos, empleando capas sensibles de 400 a 600 micras; la capa de las placas fotográficas ordinarias es, en cambio, de 2 a 3 micras.

Radiación cósmica. — Gockel observó, en 1910, que un electroscopio se descargaba más rápidamente cuando estaba situado a gran altura que al borde del mar. Por consiguiente, el aire estaba más ionizado cuanta mayor era la altura. Se hicieron entonces mediciones de la ionización, especialmente durante las ascensiones a la estratosfera, mediciones que confirmaron completamente el hecho. Utilizando la cámara de Wilson se observó que este fenómeno era debido a partículas electrizadas de gran energía procedentes del espacio: estas partículas constituyen la radiación cósmica. Su estudio ha hecho grandes progresos gracias al empleo de la técnica de la placa fotográfica para registrar las trayectorias. Para ello, se envían a gran altura, por medio de globos, placas fotográficas. Ha podido comprobarse que la radiación cósmica procedía de todos los puntos del espacio, y que era más intensa cerca de los polos que en el ecuador. Su origen es todavía desconocido, creyéndose que es debida a radiación primaria de protones de gran energía (varios miles de millones de electrones-voltios) que, por sus choques con los átomos de la atmósfera, provocan una radiación secundaria muy variada: electrones, protones, iones diversos, mesones y fotones gamma.

La acción del campo magnético terrestre sobre los protones de la radiación primaria explica por qué esta radiación cósmica es más intensa en los polos que en el ecuador.

Óptica electrónica e iónica

Principios. — Más adelante veremos que la mecánica ondulatoria asocia a toda partícula en movimiento una onda de longitud de onda $\lambda = \frac{h}{mv}$, donde h es la constante de Planck, v la velocidad de la partícula y m su masa. En esta mecánica es fácil, pues, obtener, para calcular las trayectorias de las partículas electrizadas, fórmulas que se asemejan a las de la óptica geométrica. No obstante, es inútil recurrir a la mecánica ondulatoria para demostrar los principios de la "óptica" de las partículas electrizadas, es decir, la posibilidad de refractar y de focalizar haces de partículas. Consideremos, en efecto, un electrón que se desplaza, por ejemplo, en un campo eléctrico nulo de potencial V y llega a una cara de separación S con una incidencia i; supongamos una segunda superficie de separación S′, paralela a S, y más allá de S′ un espacio de campo nulo con un potencial V′ (*fig.* 548). Designemos por r el ángulo que forma la trayectoria del electrón con la normal a la superficie S′. Si el campo es normal a S y S′ entre estas dos superficies, no modificará la componente de la velocidad del electrón según un eje perpendicular al campo, es decir, paralelo a S y S′. Los valores de estas componentes son, para el medio 1, v_1 sen i, y para el medio 2, v_2 sen r. Por consiguiente,

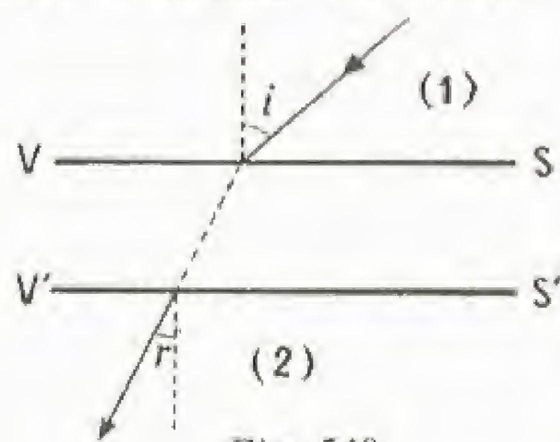


Fig. 548

$$v_1 \text{ sen } i = v_2 \text{ sen } r,$$

pero v_1 y v_2 son, respectivamente, proporcionales a $\sqrt{V}$ y $\sqrt{V'}$, y por lo tanto,

$$\sqrt{V} \text{ sen } i = \sqrt{V'} \text{ sen } r,$$

fórmula en todo comparable con la ley de Descartes:

$$n \text{ sen } i = n' \text{ sen } r.$$

Mostremos ahora cómo puede localizarse en un punto un haz de trayectorias de electrones —o de cualquier otra partícula electrizada— como si fuera un haz de rayos luminosos paralelos. Utilizaremos para ello una "lente" electrostática, constituida por un campo eléctrico perpendicular a la trayectoria inicial de los electrones y que sea proporcional en cada punto a la distancia de este punto a un eje paralelo al haz de electrones incidentes (*fig.* 549). Este campo estará limitado por dos planos P y P′. Consideremos un electrón que encuentra P en un punto situado a la distancia 1 del eje y otro electrón que encuentra dicho punto P a la distancia 2 del eje. El electrón 2 se desviará dos veces más que el primero; se encontrarán ambos en un mismo punto del eje, que será el foco de la lente. Se demuestra que la distancia focal de esta lente viene expresada por la fórmula $\frac{1}{F} = \frac{E' - E}{4\,U}$, donde U es el potencial acelerador de los electrones, y E y E′ los valores del campo eléctrico entre dos puntos de P y P′ situados sobre una trayectoria del electrón.

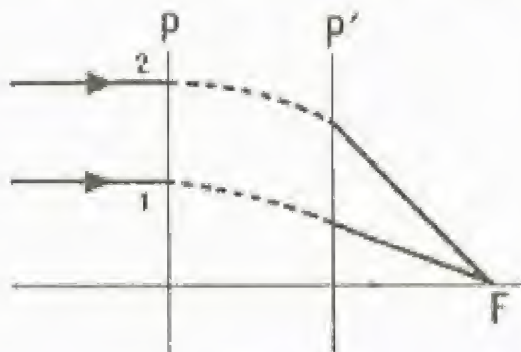
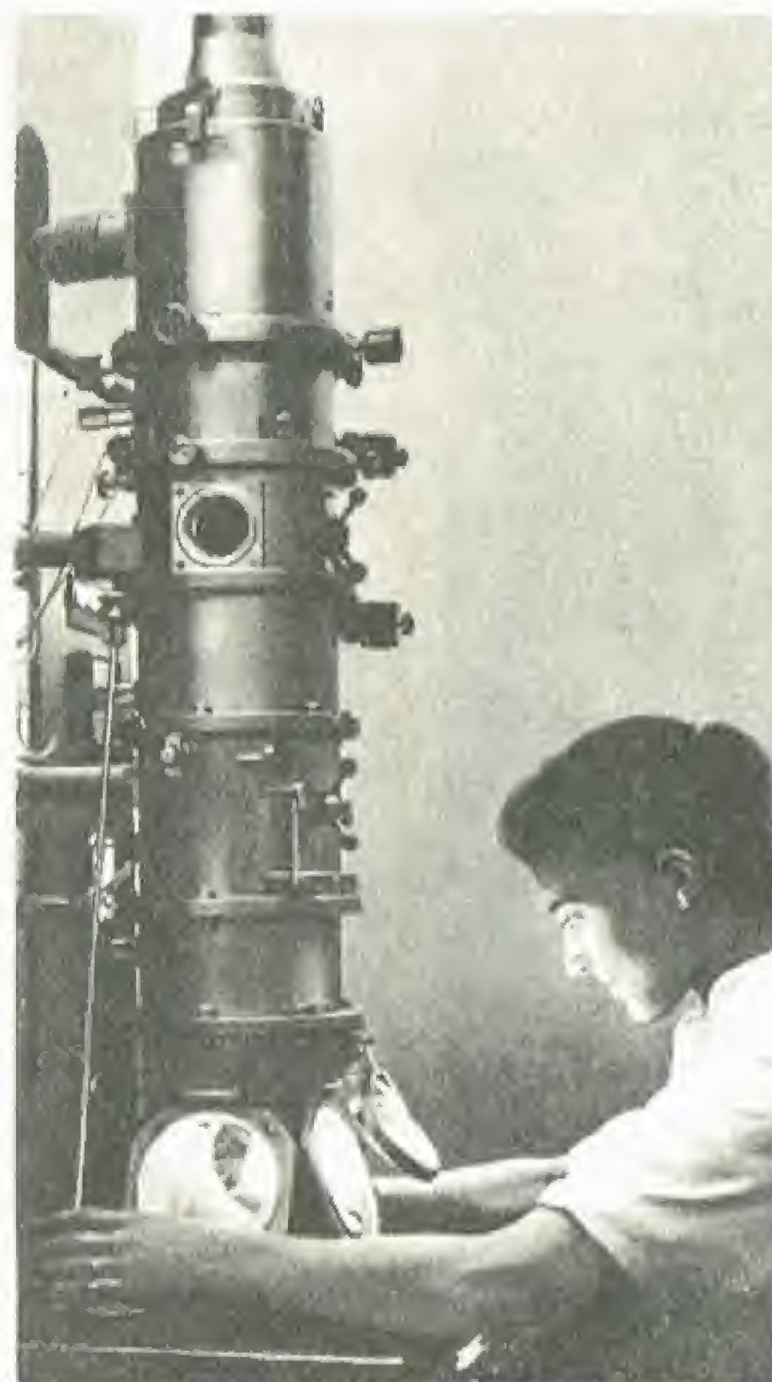


Fig. 549

Se ve que esta fórmula es independiente de la relación $\frac{e}{m}$; la distancia focal será la misma para cualquier partícula electrizada, en igualdad de las restantes condiciones. En rigor, la fórmula anterior no se aplica más que a una "lente" delgada. Con lentes gruesas, los fenómenos se complican, como sucede en óptica geométrica, produciéndose incluso aberraciones.

También pueden fabricarse lentes magnéticas por medio de campos magnéticos convenientemente escogidos. En el caso de las lentes magnéticas, la distancia focal depende de la relación $\frac{e}{m}$ y, a causa de la rotación de las trayectorias, la imagen de un objeto habrá girado cierto ángulo con respecto a dicho objeto.

Se deduce de lo anterior que si una superficie emite electrones o partículas electrizadas cualesquiera, se podrá, colocando en la trayectoria de estas partículas "lentes" electrostáticas o magnéticas, formar una imagen de la superficie emisora. También se puede obtener la imagen de una superficie por reflexión de un haz de electrones sobre esta superficie o estudiar asimismo una superficie delgada por las sombras que se obtienen cuando es atravesada por un haz de electrones.


Microscopio electrónico (*Fot. Larousse*)

Microscopio electrónico. — El microscopio electrónico es, precisamente, un aparato que permite obtener tales imágenes. La figura 550 representa el esquema de un microscopio electrónico. En él se encuentran los mismos elementos que en un microscopio óptico ordinario: condensador, objetivos, etc. Sólo falta el ocular, que en este caso es un ocular de vidrio destinado a examinar la imagen óptica formada por los electrones sobre la pantalla fluorescente. También puede reemplazarse esta pantalla por una placa fotográfica.

Según los aparatos, las lentes del microscopio electrónico serán lentes magnéticas o electrostáticas. El vacío del aparato debe ser, evidentemente, muy intenso.

La ventaja del microscopio electrónico sobre el microscopio óptico ordinario es que su poder separador es mucho mayor. Un microscopio óptico no permite distinguir dos puntos que disten menos de 0,2 micras (o sea 2 000 Å; con el microscopio electrónico llegan a distinguirse puntos que distan solamente 20 Å. El poder separador máximo de un microscopio electrónico es expresado por la fórmula.

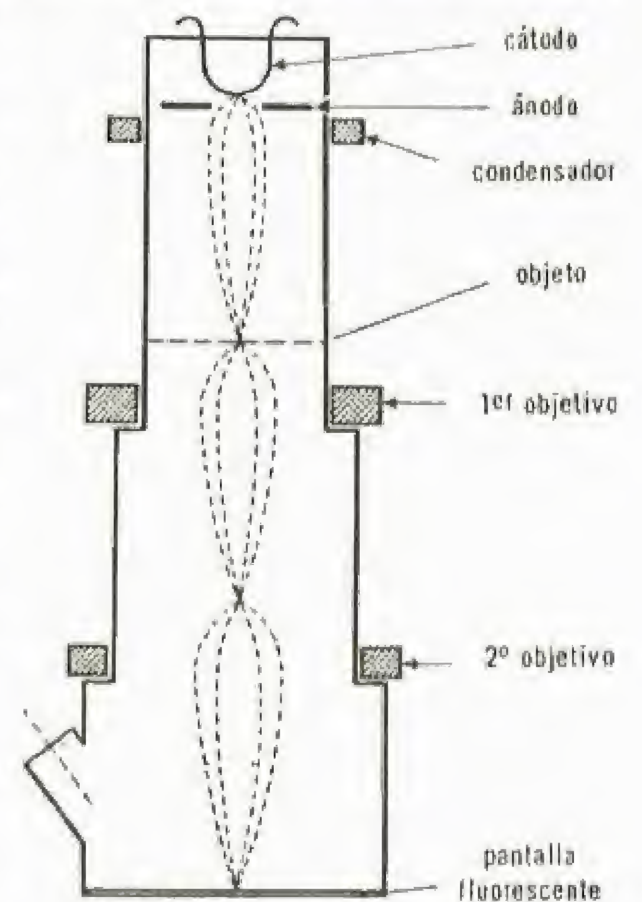
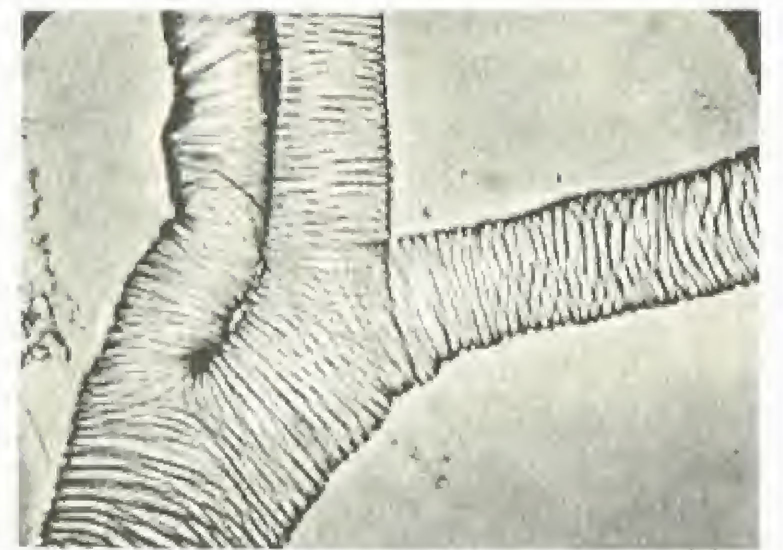


Fig. 550

$$d = \frac{1{,}22\,\lambda}{2\,n \text{ sen } u},$$

donde λ es la longitud de onda, n el índice de refracción y u el semiángulo de abertura del objetivo. Para los aparatos ópticos, $\lambda = 6 \times 10^{-5}$ cm; para los aparatos electrónicos, la fórmula de Louis de Broglie, antes citada, da como longitud de onda asociada a electrones acelerados por una tensión de 100 000 voltios $4 \times \times 10^{-10}$ cm, o sea casi 10 000 veces más pequeña. El poder separador debería ser 10 000 veces mayor, pero no llega a ser superior a 1 500 veces, porque con las lentes electrónicas no pueden obtenerse grandes ángulos de abertura, debido a que no es posible corregir las aberraciones, como sucede con las lentes ópticas. El aumento de los microscopios electrónicos puede llegar a 100 000, contra 2 000 en los mejores microscopios.


Tráqueaarteria de un mosquito, vista por el microscopio electrónico (*Fot. U. S. I. S.*)

Los microscopios electrónicos se encuentran actualmente en el comercio, y son innumerables las observaciones y los descubrimientos interesantes que han hecho posible en biología, así como en otras disciplinas científicas. Conviene, no obstante, indicar que, a causa del vacío intenso que reina en el aparato, los objetos que se examinen deben estar completamente secos, ya que de lo contrario, al ser sometidos al bombardeo electrónico, se deterioran rápidamente. Es, pues, imposible examinar cuerpos vivos con el microscopio electrónico.

¿Cuál es el porvenir del microscopio electrónico? Hemos visto que el poder de separación es tanto mayor cuanto menor es la longitud de onda asociada; ahora bien, esta última es inversamente proporcional a la masa de la partícula; de ahí la idea de utilizar haces de partículas electrizadas pesadas: los iones. Se obtendrían así microscopios iónicos. Se están haciendo actualmente tentativas en este sentido, por una parte, con iones hidrógeno: microscopio protónico, y, por otra parte, con iones alcalinos. Estos últimos son los que hasta ahora han dado los mejores resultados, y se han obtenido, en los laboratorios, imágenes muy perfectas. Se observará que la longitud de onda asociada a un ion sodio es, para partículas de la misma velocidad, más de 40 000 veces menor que para los electrones. No existe, pues, al parecer, límite para el poder separador de tales aparatos. De Broglie ha señalado, no obstante, que, debido al choque de las partículas, el objeto se desplaza, lo que disminuye la nitidez de las imágenes y reduce el poder separador. Este fenómeno será tanto más marcado cuanto más pesadas sean las partículas. Por otra parte, para poderes separadores muy pequeños, la agitación térmica de las moléculas resultará molesta.

Energía y materia

Efecto fotoeléctrico: Leyes del fenómeno. Célula fotoeléctrica. Cuanto de energía. Relación de Einstein. Potencial de extracción de los electrones. Rendimiento cuántico de una célula. Construcción de células fotoeléctricas. Células de multiplicación de electrones. Telescopio electrónico. Visibilidad con rayos infrarrojos. Células con capa de detención. Células fotorresistentes. Células empleadas en televisión. — **Rayos X:** Producción de rayos Roentgen. Propiedades de los rayos X. Naturaleza de los rayos X. Difracción cristalina de los rayos X. Verificación experimental. Aplicaciones de la difracción cristalina de los rayos X. Estructura de los cristales. Condición de posibilidad de la difracción cristalina. Diagramas de densidades electrónicas. Aplicaciones de la teoría cuántica a los rayos X. Espectro corpuscular. Rayos γ

Efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico fue descubierto por Hertz en 1887.

Leyes del fenómeno. — Cuando se proyecta sobre un metal una radiación luminosa conveniente, emite electrones: este fenómeno se ha denominado *efecto fotoeléctrico.* Puede hacerse fácilmente evidente iluminando con un haz luminoso rico en rayos ultravioleta una placa de cinc limpia colocada sobre el platillo de un electroscopio cargado (*fig.* 551). Si el electroscopio está cargado negativamente, se descarga, y si tiene electricidad positiva, la conserva. Este fenómeno se comprende fácilmente; en el primer caso los electrones emitidos por el cinc son repelidos, y en el segundo son atraídos y vuelven a la placa de cinc.

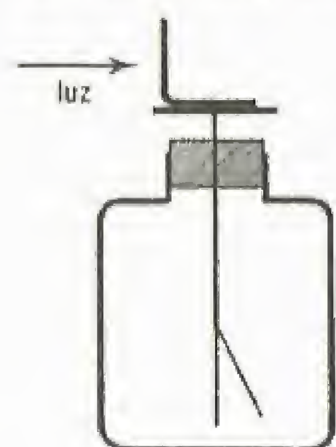


Fig. 551

El fenómeno es general, no solamente para los metales, sino también, al parecer, para la mayoría de los cuerpos. Estudiaremos aquí únicamente el efecto fotoeléctrico de los metales colocados en el vacío, y supondremos que la superficie de estos metales está absolutamente limpia, sin oxidaciones. Se comprueba:

1º Que la relación $\frac{e}{m}$ de las partículas negativas emitidas por un metal bajo el efecto de las radiaciones luminosas es igual a $1{,}77 \cdot 10^7$ u. e. m.

2º Que para un metal dado, el efecto fotoeléctrico sólo se produce en radiaciones cuyas frecuencias son superiores a una frecuencia límite ν_0.

El cinc sólo emite electrones para las radiaciones ultravioleta; para los metales alcalinos, la frecuencia límite corresponde a radiaciones visibles, o incluso al infrarrojo, por lo cual se ha estudiado principalmente el efecto fotoeléctrico de estos metales.

Célula fotoeléctrica. — Una célula fotoeléctrica es una ampolla sin aire, cuya pared interior está cubierta en una de sus partes por un depósito metálico, generalmente de potasio (*fig.* 552). Una espiral C recoge los electrones emitidos, gracias a una diferencia de potencial de un centenar de voltios establecida entre la espiral y el metal. Al recibir luz la célula, pasa una corriente que va de la espiral al metal, y cuya intensidad mide el número de electrones emitidos. Se comprueba que *el número de electrones emitidos es proporcional al flujo luminoso que recibe la célula.* Esta ley ha permitido aplicar la célula fotoeléctrica a las mediciones fotométricas; la precisión es mayor, pero la sensibilidad menor que con los métodos habituales. También se ha utilizado la célula fotoeléctrica para ciertas señalizaciones, empleando un metal sensible a las radiaciones infrarrojas: desde el momento en que un obstáculo detiene el haz de rayos infrarrojos, cesa la corriente de la célula, lo que provoca la maniobra de señalización o de cualquier otro dispositivo.

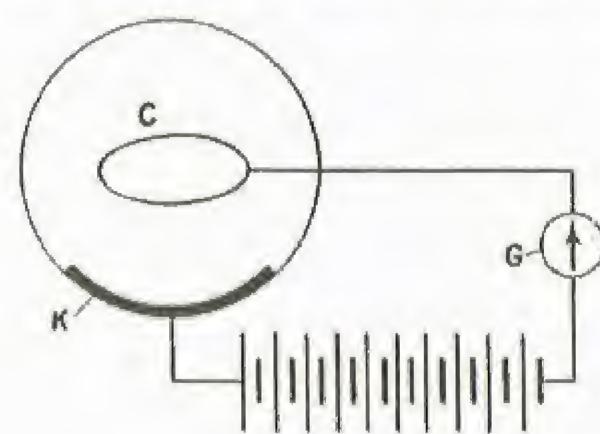


Fig. 552

Cuanto de energía. Relación de Einstein. — La teoría cuántica fue creada por Planck (1900). Cuando un metal emite electrones por efecto de una radiación, hay transformación de energía electromagnética —aportada por la radiación— en energía cinética. ¿Cómo se hace esta transformación?

Se admite actualmente, y la experiencia lo ha comprobado con mucha frecuencia, como veremos, que los *cambios de energía entre la materia y las radiaciones electromagnéticas* (ondas hertzianas, luz, rayos X) *se hacen de una manera discontinua.* Es decir: *la energía cambiada entre la materia y la radiación es siempre igual a un número entero de veces una cantidad elemental de energía denominada cuanto de energía, o simplemente cuanto.* Se admite, por otra parte, que *el cuanto de energía es proporcional a la frecuencia de la radiación electromagnética que interviene.* Si q es el cuanto de energía, y ν la frecuencia de radiación, se tendrá

$$q = h\nu,$$

siendo h una constante universal llamada *constante* de Planck, que vale $6{,}55 . 10^{-27}$ unidades C.G.S.

Apliquemos esto al efecto fotoeléctrico. Cuando se emite un electrón con la velocidad v, su energía cinética vale $\frac{1}{2} mv^2$ y, en virtud del principio de conservación de la energía, se tendrá

$$\frac{1}{2} mv^2 = h\nu.$$

Esta relación es conocida por *relación de Einstein.*

En realidad, para arrancar el electrón del metal hace falta cierta energía W_0, que sólo depende de la naturaleza del metal; podrá, pues, escribirse

$$\frac{1}{2} mv^2 + W_0 = h\nu$$

o

$$\frac{1}{2} mv^2 = h\nu - W_0,$$

y esta relación nos muestra que no podrá emitirse el electrón, es decir, que no habrá efecto fotoeléctrico más que cuando

$$h\nu > W_0$$

o

$$\nu > \frac{W_0}{h}.$$

La ley experimental que acabamos de enunciar vuelve a obtenerse, es decir, el efecto fotoeléctrico no se produce, para un metal dado, más que en radiaciones cuya frecuencia es superior a una frecuencia límite ν_0, y se tendrá

$$\nu_0 = \frac{W_0}{h}.$$

La relación $\frac{1}{2} mv^2 = h\nu - W_0$ sólo se verifica en los electrones arrancados en la superficie del metal, ya que los que proceden de las capas más profundas pueden haber sufrido choques sobre los átomos del metal que hayan reducido su velocidad. v es, pues, la velocidad máxima de los electrones, y ha podido medirse: para ello se ha colocado frente al metal estudiado una placa π (*fig.* 553) a un potencial negativo $- V$; los electrones no llegan a esta placa más que si el trabajo que proporcionan contra el campo eléctrico, trabajo igual a eV, es inferior a su energía cinética.

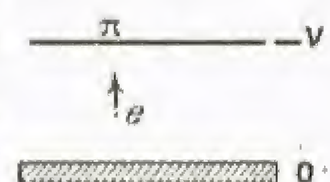


Fig. 553

Se trata de obtener, pues, el potencial $- V$, para el cual los electrones ya no alcanzan la placa, lo que se comprueba por una intensidad nula de la corriente que va de la placa al metal. Entonces se tendrá

$$\frac{1}{2} mv^2 = eV,$$

de donde

$$v = \sqrt{2 \frac{e}{m} V}.$$

Los resultados obtenidos concuerdan bien con la *relación de Einstein*; en particular, la velocidad máxima de los electrones sólo depende de la *frecuencia* ν de la radiación excitatriz y en modo alguno de su intensidad.

Potencial de extracción de los electrones. — Puede escribirse

$$W_0 = eV;$$

V será el potencial mínimo que permita proporcionar a un electrón una energía suficiente para que abandone el metal. Éste es el potencial de extracción, que basta para vencer las fuerzas de atracción ejercidas por las cargas positivas que la partida del electrón deja en el metal. Este potencial de extracción varía con la naturaleza del metal. He aquí sus valores para algunos metales:

Na	2,5	voltios	Fe	4,8	voltios
K	2,3	»	Ni	5,0	»
Rb	2,1	»	Mo	4,1	»
Cs	1,8	»	Mg	2,4	»
Zn	3,4	»	Ca	2,3	»

Para que haya efecto fotoeléctrico por efecto de una radiación de longitud de onda λ, es necesario que se tenga

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} > eV;$$

para $V = 3{,}1$ voltios, se tiene $\lambda = 4\,000$ Å, que corresponde al límite de la luz visible. Los metales para los cuales $V > 3{,}1$, no producirán efecto fotoeléctrico con la luz visible, como sucede con el cinc, que no emite electrones más que por efecto de las radiaciones ultravioleta.

Rendimiento cuántico de una célula. — Cabe preguntarse si todos los cuantos de energía que actúan sobre la capa sensible de una célula crearán otros tantos electrones. La respuesta es negativa. El cálculo demuestra que, para un flujo luminoso de longitud de onda λ (expresado en angstrœms), que transporta una energía de un vatio, si

todos los cuantos de energía liberaran un electrón, se tendría en la célula una corriente i expresada en amperios por la fórmula

$$i = \frac{\lambda}{12\,400}.$$

En la práctica, esta corriente es sólo de unas centésimas o milésimas de esa corriente teórica. Se dice que el rendimiento cuántico es de algunas centésimas o de algunas milésimas. El rendimiento cuántico mide, por consiguiente, la proporción entre los cuantos que liberan un electrón en el metal de la célula y los cuantos incidentes totales.

Construcción de células fotoeléctricas. — Para construir las células fotoeléctricas se ha utilizado primeramente como capa sensible metales alcalinos, pero el rendimiento cuántico es bajo (de 10^{-4} a 10^{-5}), y por consiguiente la sensibilidad. Se llega a sensibilizar los metales alcalinos formando en su superficie una capa muy delgada de hidruro. Una de las células más empleadas está construida de la siguiente forma: la capa sensible comprende una placa de plata ligeramente oxidada en la superficie y sobre la cual se deposita, por evaporación en el vacío, cesio, en proporción de 0,25 miligramos por centímetro cuadrado. El rendimiento cuántico de una célula de este tipo es de 1/350 por 8 400 Å.

Con aleaciones de cesio y antimonio se han obtenido rendimientos cuánticos del 20 por ciento. Recientemente se han construido células fotoeléctricas con atmósfera de hidrógeno.

Células de multiplicación de electrones. — Un electrón acelerado por una tensión de unos cuantos centenares de voltios provoca, al golpear un metal, la emisión de un número variable, que puede llegar

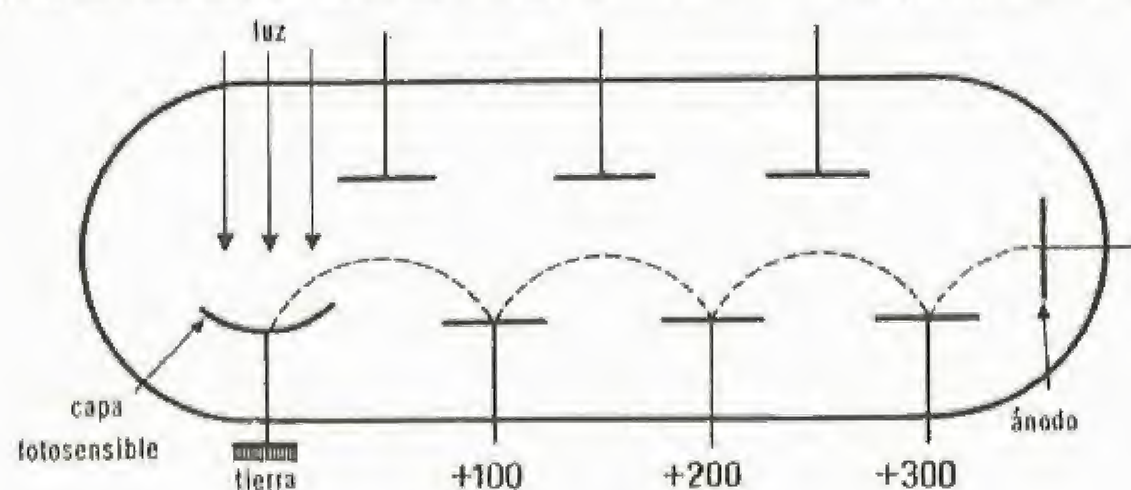


Fig. 554

a 10, de electrones secundarios. Este fenómeno se ha utilizado para amplificar la corriente de las células fotoeléctricas. Para ello, se aceleran los electrones emitidos por la capa sensible y se les proyecta sobre un blanco metálico; después se vuelve a empezar con electrones secundarios emitidos por el blanco, etc. De esta forma, la amplificación de la corriente de la célula puede llegar a 10^6. La figura 554 representa el esquema de una célula de multiplicación de electrones.

Telescopio electrónico. Visibilidad con rayos infrarrojos. — Utilizando capas sensibles semitransparentes, han podido construirse aparatos que permiten observar objetos iluminados con luz infrarroja. Para ello, se aceleran los electrones emitidos por la capa sensible, electrones que son proyectados sobre una pantalla fluorescente semitransparente. Este tipo de aparato se ha utilizado con proyectores de infrarrojos para "ver" en la obscuridad con luz "invisible".

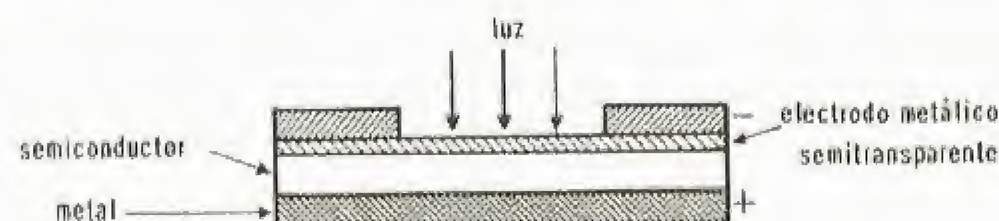


Fig. 555

Este principio se utiliza en astronomía para amplificar la brillantez de las imágenes dadas por los telescopios.

Células con capas de detención. — Si se ilumina la superficie de contacto de un metal o de un semiconductor, como el selenio, el óxido cuproso o el sulfuro de talio, se crea entre el metal y el semiconductor una fuerza electromotriz. Se arrancan electrones del semiconductor, que se dirigen hacia el metal. La corriente de cortocircuito de este tipo de célula (*fig.* 555) es proporcional a la iluminación, y la fuerza electromotiz alcanza bastante rápidamente un valor de saturación del orden de 150 milivoltios.

Las células con capas de detención son de utilización sencilla, porque no tienen fuente de tensión auxiliar. Como no son adecuadas para las medidas de precisión, se utilizan sobre todo como relés para mandos por señales luminosas, y, en fotografía, para medir aproximadamente el valor de la iluminación de las escenas que se fotografían.



Tipos de exposímetros, células con capa de detención, empleados en fotografía (*Fot. Larousse*)

Células fotorresistentes. — Los semiconductores análogos a los que se utilizan en las células con capa de detención tienen una resistencia que varía al recibir la luz. De esta forma se puede entonces detectar un flujo luminoso, ya que la variación de la resistencia es independiente de la forma del haz luminoso, y sólo depende de la energía que transporta.

Células empleadas en televisión. — Las células utilizadas en televisión son complejas, y sus capas sensibles están constituidas, en general, por cesio sobre plata. Su función es traducir en la estación emisora las "señales" luminosas de la imagen que hay que televisar en señales eléctricas.

Rayos X

Los rayos X fueron descubiertos por **Roentgen** en 1895, que los denominó rayos X porque desconocía su naturaleza, explicada después por **Friedrich** y **Knipping** (1912).

Producción de rayos Roentgen. — La radiación X se produce cuando un haz de rayos catódicos es detenido por un obstáculo metálico. Para obtener haces intensos de rayos X se utilizan tubos de Crookes o tubos Coolidge, con un cátodo cóncavo, colocando el obstáculo metálico B en el punto de convergencia de los rayos catódicos (*figura* 556), denominado anticátodo, que generalmente está conectado al ánodo. A causa del bombardeo electrónico, el anticátodo se calienta, por lo cual se le escoge grueso, e incluso se le refrigera frecuentemente con una corriente de agua. Los tubos Coolidge son los más empleados actualmente para la producción de rayos X, ya que su rendimiento es mejor que el de los tubos de Crookes, que tienen, además, el inconveniente de exigir un sistema regulador de la presión. Se comprueba, en efecto, al utilizarlos, que la presión disminuye en un tubo de Crookes, inconveniente que no es de temer con el tubo Coolidge, puesto que se ha hecho en él un vacío lo más perfecto posible.

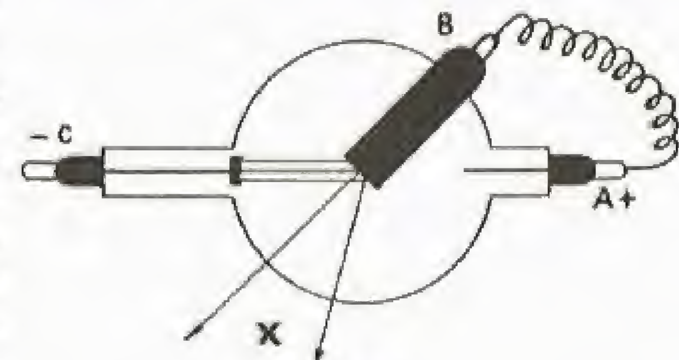


Fig. 556

Propiedades de los rayos X. — Los rayos X provocan la fluorescencia del platinocianuro de bario y del tungstato de cadmio, impresionando, además, las placas fotográficas. Para detectarlos, se utilizan pantallas de platinocianuro de bario o una placa fotográfica.

Los rayos X se propagan en línea recta a través de todas las substancias, siendo ésta su propiedad más notable, y además se dejan absorber muy poco. Así como un haz de luz es detenido por un simple papel negro, los rayos X pueden atravesar espesores considerables de materias como el cuerpo humano, una pared o planchas.

Los metales son los que presentan el mayor poder absorbente, que es tanto mayor cuanto mayor es la masa atómica del metal; una pantalla de plomo de 2 cms de espesor (Pb = 207) puede detener casi todos los rayos X.

Cuando se ilumina un objeto con rayos X, las partes más absorbentes producen sombras, que pueden observarse ya sobre una pantalla fluorescente, lo que constituye la *radioscopia*, ya sobre una placa fotográfica, que es la *radiografía*. La radioscopia y la radiografía son muy utilizadas en medicina, ya para descubrir fracturas del esqueleto, que es bastante opaco a los rayos X, ya para caracterizar lesiones de órganos: pulmones, estómago, etc. Como el estómago es bastante transparente a los rayos X, su sombra es bastante tenue; para subsanar este inconveniente, se hace ingerir a los enfermos una substancia más opaca, por lo general una sal de bario. En metalurgia, los rayos Roentgen se utilizan para descubrir los defectos de una pieza metálica; por ejemplo, burbujas de aire.

Una substancia cualquiera emite electrones al recibir rayos X, electrones que están, por lo general, animados de grandes velocidades. Este fenómeno está en relación con el efecto fotoeléctrico. Cuando la substancia es un gas, los electrones emitidos provocan su ionización, y la medida de esta última sirve para conocer la intensidad del haz de rayos Roentgen.

Una irradiación prolongada de rayos X es peligrosa para el organismo: produce quemaduras con frecuencia irremediables. Por eso los que utilizan estos rayos suelen protegerse por medio de pantallas de plomo y de delantales que contienen plomo.

Naturaleza de los rayos X. — Los rayos X no son desviados ni por un campo eléctrico ni por un campo magnético, y su velocidad de propagación, que ha podido medirse, es igual a la de la luz, de donde se ha deducido que los rayos X son de naturaleza análoga a las radiaciones luminosas, de las que sólo difieren por la longitud de onda. Se intentó demostrar esta hipótesis tratando de repetir con los rayos X las experiencias clásicas de la óptica: reflexión, refracción, difracción, pero hasta 1912 todos estos ensayos fueron vanos. En esa fecha fue cuando el físico Laue consiguió obtener fenómenos de difracción utilizando un cristal que,

como se verá más adelante, es, en realidad, una red. Desde entonces se ha conseguido obtener la reflexión, la refracción e incluso la difracción de los rayos X por medio de las redes ordinarias de la óptica, pero empleando *incidencias rasantes*, es decir, que los ángulos de incidencia sólo deben diferir unos minutos de 90°. La figura 557 representa el esquema de una experiencia realizada por el físico Siegbahn: se dirige un haz fino de rayos X sobre un prisma, cerca de su arista, obsevándose sobre una pantalla tres manchas R, R' y D, que corresponden a los rayos reflejados, refractados y no desviados. Se verá que los rayos se desvían en sentido inverso al de los rayos luminosos. El índice del vidrio para los rayos X es menor que el índice del aire. Esta experiencia ha permitido comprobar que los índices de las diversas substancias para los rayos X son inferiores a la unidad; sólo se diferencian por otra parte en cantidades del orden de la millonésima, lo que explica las dificultades con que se ha tropezado para reproducir con los rayos X los fenómenos clásicos de la óptica.

Fig. 557

Los primeros fenómenos de difracción de los rayos X fueron obtenidos por Laue, como ya hemos dicho, utilizando cristales. Estos fenómenos fueron los que permitieron hacer las primeras mediciones de las longitudes de onda de los rayos X, al propio tiempo que se verificaban las hipótesis de Bravais sobre la estructura de los cristales. Más recientemente (Thibaud), se ha conseguido medir las longitudes de onda de los rayos Roentgen utilizando la difracción por reflexión sobre redes planas ordinarias; no insistiremos en este último método, que teóricamente es el mismo que el utilizado para las radiaciones luminosas. Presenta, no obstante, una gran importancia, por haber permitido comprobar los resultados conseguidos por el método de difracción por los cristales. Antes de exponer éste, daremos sus resultados.

Las longitudes de onda de los rayos X son muy pequeñas, variando desde 500 angstrœms a 0,1 angstrœms. Recordemos que la longitud de onda de la raya amarilla del sodio es de 5 890 angstrœms y que el

angstrœms vale $\frac{1}{10\,000}$ de micra o $\frac{1}{10\,000\,000}$ de milímetro.

Los rayos de grandes longitudes de onda —de 100 a 10 angstrœms— se denominan *rayos blandos* porque, en efecto, son poco penetrantes, y basta una capa de aire de algunos centímetros de espesor para detenerlos: son, por consiguiente, mucho menos penetrantes que las radiaciones luminosas.

Los *rayos duros*, de longitudes de onda cortas —del orden de algunos angstrœms a algunas décimas de angstrœm— son, en cambio, muy penetrantes; sus propiedades son las que se han mencionado en el párrafo anterior.

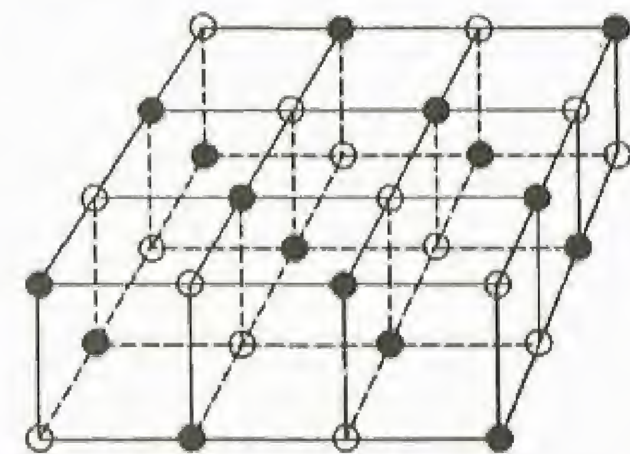


Fig. 558

Difracción cristalina de los rayos X. — Se admite actualmente que, en un cristal cualquiera, los átomos están dispuestos regularmente: por ejemplo, en un cristal de cloruro de sodio, los átomos de cloro y de sodio no están contiguos los unos a los otros, sino formando los vértices de pequeños cubos yuxtapuestos (*fig.* 558). Los átomos pueden agruparse por planos paralelos, viéndose fácilmente que, para el cristal que consideramos, existen tres clases de tales planos (v. *fig.* 558). Estos planos se llaman *reticulares*, y se admite su existencia para todos los cristales. Si cortamos un cristal por un plano vertical paralelo a las aristas de los cubos (*figura* 559), las líneas h_1 h_2, ... son las intersecciones de los planos reticulares horizontales sobre nuestro plano de corte, siendo d la distancia entre los dos planos reticulares.

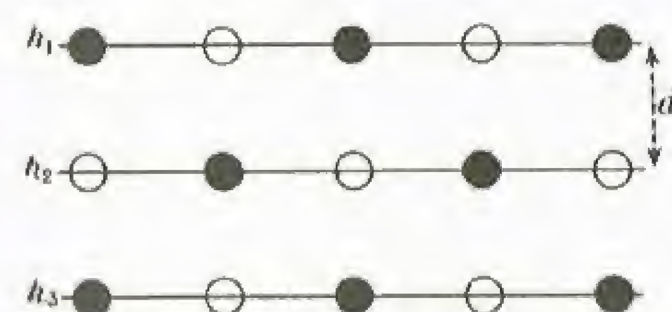


Fig. 559

Cuando una radiación luminosa visible incide sobre el cristal, no penetra en él, sino que es sencillamente difractada en todas las direcciones por los átomos de dicha superficie. Si θ es el ángulo que forma el haz incidente con la superficie del cristal, muestra el cálculo que todos los rayos difractados en dirección diferente que la que forma el ángulo θ con la superficie se destruyen por interferencia. Es decir, que sólo existe un haz difractado visible, que es el que forma el ángulo θ con la superficie (*fig.* 560); este haz es el que se llama ordinariamente haz reflejado, obteniéndose así de nuevo la ley de la reflexión.



Fig. 560

Si utilizamos ahora un haz de rayos X, éste penetrará en el interior del cristal y los rayos serán difractados no sólo por los átomos de la superficie, sino también por los del interior. Muestra el cálculo que, para una incidencia cualquiera, los rayos difractados en todas las direcciones se destruyen por interferencias; no existe, en general, haz reflejado. Pero si el haz, compuesto por rayos de longitud de onda λ, forma con los planos reticulares un ángulo θ tal que

$$2d \text{ sen } \theta = p\lambda,$$

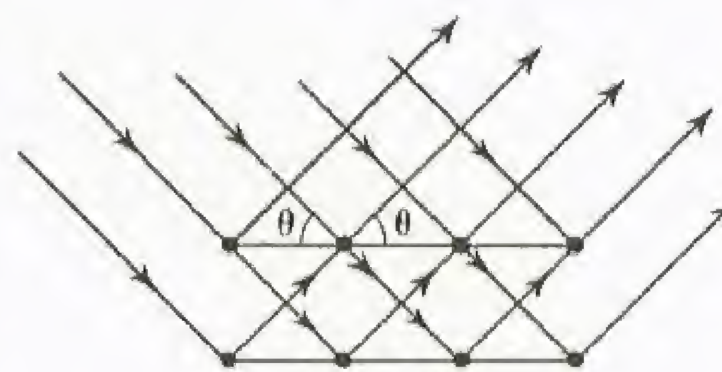


Fig. 561

donde d es la distancia entre los planos reticulares y p un entero cualquiera, existe un haz reflejado que forma, con los planos reticulares, un ángulo igual a θ (*fig.* 561).

Veamos ahora cómo se ha verificado experimentalmente esta propiedad, de extrema importancia a causa de sus aplicaciones.

Verificación experimental. — Cuando un haz de rayos X, de longitud de onda λ, incide sobre un cristal, el ángulo que forma con los planos reticulares no satisface, por lo general, a la relación $2d$ sen θ = $p\lambda$; entonces se hace girar el cristal alrededor de un eje perpendicular a los rayos del haz incidente, y se observa, en efecto, un haz reflejado en ciertas posiciones del cristal. En ángulo correspondiente θ se determina fácilmente si se observa que el haz reflejado ha girado un ángulo 2θ (*fig.* 562). Se verifica que si hace reflexión para ángulos de θ_1, θ_2, θ_3, ..., etc., se tendrá

Fig. 562

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{1} = \frac{\text{sen } \theta_2}{2} = \frac{\text{sen } \theta_3}{3} = \ldots$$

Estas relaciones son, en virtud de la fórmula $2d$ sen $\theta = p\lambda$, iguales a $\frac{\lambda}{2d}$, de forma que el fenómeno nos permite calcular λ o d, según se conozca d o λ. Si el haz utilizado contiene rayos de diversas longitudes de onda λ_1, λ_2, ..., estos rayos se reflejarán sucesivamente para ángulos θ_1, θ'_1, ..., etc., y si los rayos reflejados son recogidos por una placa fotográfica, se obtendrán manchas diferentes para rayos de longitudes de onda diferentes: tendremos así el *espectro* del haz considerado.

Aplicaciones de la difracción cristalina de los rayos X. — Acaba de verse que la difracción de los rayos X por los cristales permite obtener su espectro, así como la medición de las longitudes de onda, si se conoce la distancia entre los planos reticulares. Se ha visto que la longitud de onda de los rayos X puede medirse por medio de redes ordinarias y, por consiguiente, podrá determinarse, de una vez para siempre las distancias entre los planos reticulares de una clase de cristales y utilizarlas después para la medida de las longitudes de onda, ya que el método de difracción cristalina es más cómodo que el que utiliza redes ordinarias.

Por otra parte, es posible medir la relación de las dos longitudes de onda de rayos X sin conocer las distancias de los planos reticulares, puesto que se tiene

$$\frac{\lambda}{\lambda'} = \frac{\text{sen } \theta'}{\text{sen } \theta}.$$

Las medidas relativas son mucho más precisas que las absolutas, porque las distancias de los planos reticulares no se conocen con gran exactitud.

Estructura de los cristales. — Las distancias entre los planos reticulares pueden calcularse directamente, como se ha hecho antes de obtener las medidas de la longitud de onda por medio de redes planas. Consideremos, en efecto, un cubo elemental ABCDEFGH de un cristal de cloruro de sodio (*fig.* 563). Las tres clases de planos reticulares son ABCD, BFHD y EDB, viéndose fácilmente que si a es la arista del cubo, las distancias entre los planos reticulares son a, $a\sqrt{2}$ y $a\sqrt{3}$; así lo confirma la experiencia. Sea M la masa molecular del cristal; si N es el número de Avogadro, la masa M contiene N átomos de cloro y N átomos de sodio, es decir, 2N átomos en total; estos 2N átomos ocupan un volumen $V = \frac{M}{d}$, siendo d la densidad del cristal. A un átomo le corresponde un cubo elemental, puesto que hacen falta ocho átomos para un cubo y un átomo es común a ocho cubos; se tendrá, pues,

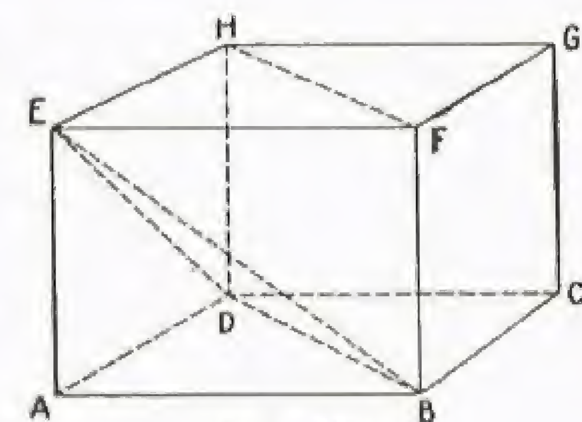


Fig. 563

$$V = 2Na^3,$$

de donde

$$\frac{M}{d} = 2Na^3,$$

y $$a = \sqrt[3]{\frac{M}{2\,Nd}}.$$

Así se obtiene, para el cloruro de sodio, el valor

$$a = 2{,}814 \text{ angstrœms},$$

que es precisamente lo que da la experiencia.

Condición de posibilidad de la difracción cristalina. — Es evidente que la difracción cristalina de los rayos X sólo tendrá lugar si la fórmula

$$2d \operatorname{sen} \theta = p\lambda$$

da, por lo menos para sen θ, un valor inferior a 1, por lo que la condición de posibilidad será

$$\frac{\lambda}{2d} < 1.$$

Con el cloruro de sodio, la distancia mayor entre los planos reticulares es $a \sqrt{3} = 2{,}814 \times \sqrt{3} = 4{,}8$ angstrœms; la difracción cristalina sólo podrá observarse para longitudes de onda inferiores a 9,6 angstrœms. La mica, en la cual la distancia entre los planos reticulares es de 10 angstrœms, permite algo más, habiéndose llegado incluso a medir longitudes de onda de 100 angstrœms con las sales de plomo de ciertos ácidos grasos.

Diagramas de densidades electrónicas. — La difusión de las radiaciones X por los átomos de un cristal es debida a los electrones que rodean el núcleo. Los poderes de difusión de los diversos átomos varían, pues, según el número y la disposición de los electrones alrededor del núcleo. El estudio de los espectros de difracción de los rayos X por las moléculas permite, mediante cálculos complejos, construir un diagrama de la densidad electrónica en las moléculas. Estos diagramas dan una representación de la estructura molecular, puesto que los puntos de gran densidad electrónica son los átomos. Es notable comprobar que, en el caso de las moléculas orgánicas complejas, estos diagramas reproducen los bien conocidos esquemas de los químicos, como, por ejemplo, el exágono del benceno.

Aplicaciones de la teoría cuántica a los rayos X. — Los rayos Rœntgen se producen al transformarse la energía cinética de los electrones en energía electromagnética. Esta transformación es una transformación cuántica, y puede aplicarse la relación de Einstein (v. p. 157). Si ν es la frecuencia de la radiación X, y $\frac{1}{2} mv^2$ la energía cinética de un electrón, se tendrá

$$h\nu = \frac{1}{2} mv^2.$$

Pero no toda la energía cinética del electrón se transforma en radiación X, sino que parte de ella se transforma en calor, de forma que la frecuencia ν de la fórmula precedente es la frecuencia máxima de los rayos X que se puede obtener al detener electrones de velocidad v. Se tiene además (v. p. 153)

$$\frac{1}{2} mv^2 = eV,$$

donde V es la diferencia de potencia que "lanza" los electrones. Para una diferencia de potencial dada, sólo podrán, pues, obtenerse rayos X de frecuencia superior a

$$\nu = \frac{eV}{h}$$

o de longitud de onda inferior a

$$\lambda = \frac{hc}{eV}, \text{ puesto que } \lambda = \frac{c}{\nu},$$

donde c es la velocidad de la luz, que es la de la radiación X.

Esta fórmula es plenamente confirmada por la experiencia. Para una diferencia de potencial dada se obtienen rayos de longitudes de onda muy diferentes, pero siempre superiores o iguales al límite calculado por la relación de Einstein.

Ya se ha dicho que cuando una substancia cualquiera recibe un haz de rayos X, emite electrones; también en este caso deberá aplicarse la relación de Einstein; veremos cómo proporciona un nuevo método para medir las longitudes de onda.

Espectro corpuscular. — La absorción de los rayos X por un cuerpo dado y para un espesor dado disminuye cuando aumenta la frecuencia de la radiación, pero el fenómeno es discontinuo. En la curva de la figura 564 se ha representado la absorción en ordenada y las frecuencias en abscisas. Para ciertas frecuencias ν_1, ν_2, la absorción aumenta bruscamente. Estas frecuencias ν_1, ν_2 son características de los elementos químicos que constituyen la pantalla absorbente.

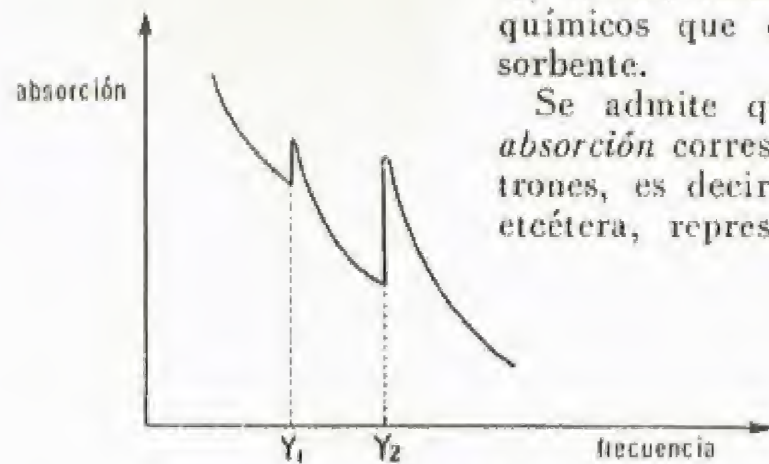


Fig. 564

Se admite que las *discontinuidades de absorción* corresponden a la emisión de electrones, es decir, que los cuantos $h\nu_1$, $h\nu_2$, etcétera, representan la energía necesaria para arrancar ciertos electrones de la pantalla absorbente. Mientras que la frecuencia sea inferior a ν_1, la radiación X sólo suministrará cuantos inferiores a $h\nu_1$ y no podrá arrancarse ningún electrón; una vez alcanzada la frecuencia ν_1, se arranca un electrón y desaparece una parte de la energía de la radiación X, lo que produce un aumento de la absorción.

Las velocidades de los electrones arrancados por la radiación X han podido medirse basándose en la desviación magnética. El aparato está concebido de tal forma que todos los electrones de la misma velocidad forman, después de haber atravesado una rendija F (*fig.* 565), una raya fina R en una placa fotográfica P. Si se empleara una radiación de frecuencia ν, superior a las frecuencias ν_1 y ν_2, los cuantos $h\nu_1$ y $h\nu_2$, representarían las energías necesarias para arrancar los electrones, y las cantidades h (ν — ν_1) y h (ν — ν_2) serían las energías transformadas en energía cinética; si v_1 y v_2 son las velocidades de los electrones que corresponden a las frecuencias v_1 y v_2, se tendrá

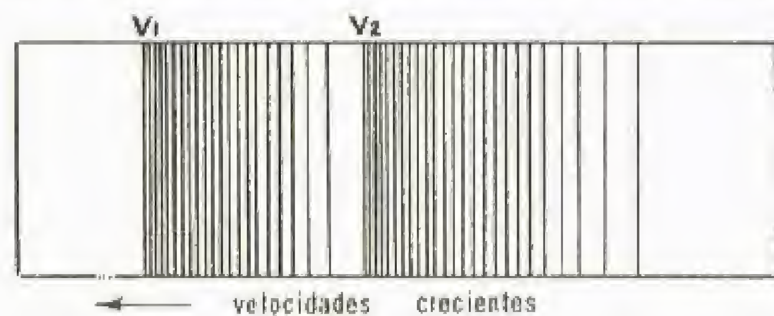


Fig. 565

$$\frac{1}{2} mv_1^2 = h(\nu - \nu_1), \quad \frac{1}{2} mv_2^2 = h(\nu - \nu_2).$$

En realidad, v_1 y v_2 son velocidades máximas, ya que los electrones pueden sufrir choques, y se obtienen electrones de velocidades muy diferentes; el aspecto de la placa fotográfica será el que representa la figura 566. Los electrones no forman rayas, sino bandas, muy claramente limitadas del lado de las grandes velocidades; estos límites corresponden a las velocidades máximas v_1 y v_2. La experiencia ha permitido verificar de esta forma la relación de Einstein, con una precisión de algunas milésimas. Si se conoce la frecuencia ν, podrá determinarse la discontinuidad de absorción ν_1 y ν_2; inversamente, si se conocen ν_1 y ν_2, podrá calcularse ν, procedimiento de medición de las frecuencias de los rayos X, el cual sólo se aplica por otra parte para las grandes frecuencias, que no permiten se las determine por medio de la difracción cristalina.

Fig. 566 (V1, V2 — velocidades crecientes)

El aspecto de la figura 566 recuerda el espectro óptico; de ahí el nombre de *espectro corpuscular* con que ha sido designado.

Observación. Las energías $h\nu_1$ y $h\nu_2$ necesarias para arrancar electrones por la radiación X son mucho mayores que la energía $h\nu_0$ necesaria para arrancar un electrón por una radiación luminosa o ultravioleta (efecto fotoeléctrico); en efecto, no se trata de los mismos electrones, ya que los primeros están muy cerca del núcleo y los otros están muy alejados.

Las velocidades de los electrones arrancados por los rayos X son del orden de 100 000 kilómetros por segundo.

Rayos γ. — Si en lugar de proyectar sobre un blanco electrones negativos se proyectan electrones positivos, no se obtienen rayos X, sino otra radiación mucho más penetrante, es decir, de longitud de onda menor. Es la radiación γ, observada por vez primera en las emisiones de los cuerpos radiactivos. La producción de rayos γ por los positones es de origen completamente diferente de la de los rayos X por los electrones. Veremos más adelante que se trata de una transformación de la materia en energía.



Espectro de la radiación de un anticátodo de tungsteno (cristal giratorio: M. de Broglie)

Radiactividad natural

Estudio de las radiaciones radiactivas: Aislamiento de los cuerpos radiactivos naturales. Medición de la radiactividad. Propiedades generales de las radiaciones radiactivas. Naturaleza de las radiaciones radiactivas. Rayos α. Trayectorias de las partículas α. Rayos β. Rayos γ. Calor desprendido por los elementos radiactivos.—**Transmutaciones radiactivas:** Emanación del radio. Período de un cuerpo radiactivo. Cálculo del período de un cuerpo radiactivo. Origen del radio y edad de los minerales. Descendencia radiactiva. — **Teoría de la constitución del átomo:** Clasificación de Mendeleev y número atómico. Leyes de Soddy. Isótopos. Número de electrones planetarios. Dimensiones del núcleo y del átomo. Experiencia de Rutherford. Neutrones. Neutrinos. Estructura del núcleo atómico

Estudio de las radiaciones radiactivas

En 1896, **H. Becquerel** descubrió que el uranio y sus sales emiten una radiación capaz de atravesar los cuerpos y de impresionar una placa fotográfica. **María Curie** (1897) mostró que el torio poseía la misma propiedad, a la cual se dio el nombre de *radiactividad*.

En 1934, los esposos **Joliot** consiguieron obtener un isótopo radiactivo del fósforo bombardeando el aluminio con rayos α. Esto constituyó el primer ejemplo de radiactividad artificial, y desde entonces se producen cantidades importantes de elementos radiactivos artificiales. Se tiene conocimiento actualmente, de más de 200 de estos elementos.

Aislamiento de los cuerpos radiactivos naturales. — Se conocen unos 30 cuerpos radiactivos naturales, de los cuales el más importante es el *radio*, descubierto por los esposos Curie en 1898, en ciertos minerales que contenían uranio. Este cuerpo, el radio, varios millones de veces más activo que el uranio, es el que mejor se presta al estudio de la radiactividad. Desde el punto de vista químico, el radio es un metal análogo al bario, del cual es además difícil de separar, lo que se consigue, no obstante, aprovechando el hecho de que los bromuros de estos dos metales tienen solubilidades diferentes. El radio se ha preparado en estado metálico —en 1910—, pero se le utiliza siempre en forma de sal. La radiactividad es, en efecto, una propiedad atómica que no depende en absoluto de las combinaciones químicas en las cuales intervienen los elementos radiactivos.

Los principales minerales de radio son: la *autunita*, la *carnotita* y la *betafita*, que se explotan en Portugal, el Colorado (Estados Unidos), Madagascar y el antiguo Congo Belga.

El contenido de radio de estos minerales oscila entre 50 y 4 miligramos por tonelada, siendo necesario utilizar varios centenares de toneladas de productos químicos para extraer medio gramo de radio; se comprende que en estas condiciones, el precio del gramo de radio sea elevado.

Con la obtención de cuerpos radiactivos artificiales, el aislamiento del radio de los minerales que lo contienen ha perdido gran parte de su interés.

Medición de la radiactividad. — Las substancias radiactivas ionizan el aire que las rodea, y la medida de esta ionización es la de la radiactividad. El principio de la medida es el siguiente: se coloca la substancia radiactiva entre las dos armaduras de un condensador plano (*fig.* 567); al hacerse conductor el aire comprendido entre las dos placas del condensador, éste se descarga y la velocidad con que pierde su electricidad constituye la medida de la ionización del aire.

Estas medidas han permitido comprobar:

1º Que la radiactividad de un cuerpo es proporcional a la masa del elemento radiactivo que contiene y no depende de la naturaleza química del compuesto en el cual entra este elemento;

2º Que la radiactividad de un elemento es una constante, independiente de todo factor físico conocido. La radiactividad del radio es la misma en el hidrógeno líquido (— 250º C) que al rojo.

+ + + + + + + +

— — — — — — —

Fig. 567

Propiedades generales de las radiaciones radiactivas. — Las radiaciones radiactivas impresionan las placas fotográficas, descomponen el ácido nítrico, transforman el fósforo blanco en fósforo rojo, etcétera; poseen propiedades químicas. Muchas substancias, por efecto de una radiación radiactiva, se hacen luminiscentes. Esta propiedad se aplica en las esferas luminosas de los relojes, las cuales están cubiertas de sulfuro de cinc al que se añaden cantidades pequeñas de radio.

El radio tiene también efectos fisiológicos que se utilizan en medicina, pero que pueden provocar quemaduras extremadamente peligrosas e incluso mortales.

Naturaleza de las radiaciones radiactivas. — Los campos magnéticos y eléctricos separan las radiaciones radiactivas en tres partes, designadas por radiación α, radiación β y radiación γ. La desviación que experimentan los *rayos α* bajo la acción de los campos eléctrico y magnético es análoga a la de los *rayos positivos*; las desviaciones experimentadas por los *rayos β* son del mismo sentido que la de los *rayos catódicos*, es decir, inverso al de los rayos α; los *rayos γ* no sufren desviación (*fig.* 568). Esto obliga a admitir que los rayos α están constituidos por cargas positivas en movimiento y los rayos β por cargas negativas, y que los rayos γ son análogos a los rayos X, pero de longitudes de onda todavía más pequeñas.

Rayos α. — Las medidas de la velocidad y el cociente $\frac{e}{m}$ de las partículas α han dado los siguientes resultados:

1º La velocidad depende del elemento que produce la radiación: varía entre 15 000 y 25 000 kilómetros por segundo;

2º El cociente $\frac{e}{m}$ es constante, cualquiera que sea el elemento radiactivo empleado; es igual a 4 800 u.e.m.

Para conocer la naturaleza de la partícula α, es necesario determinar su carga *e*, de la cual ha de deducirse su masa. El principio de esta determinación es el siguiente: se cuenta primeramente el número de partículas α emitido por un peso determinado de radio, y después se mide la carga transportada por el haz de rayos α recogiéndola en un cilindro de Faraday. De la carga total y del número de partículas se deduce la carga de cada una de ellas.

Para contar las partículas α, se envía un haz de ellas sobre una pantalla cubierta de sulfuro de cinc; cada vez que una partícula α tropieza con la pantalla, se produce un centelleo. Utilizando una pantalla pequeña de 0,5 cm², colocada a un centímetro de una millonésima de miligramo de radio, pueden contarse 5 ó 6 partículas por segundo, de donde se deduce que una millonésima de miligramo de radio emite en todas las direcciones 140 partículas α por segundo, y un miligramo 140 millones.

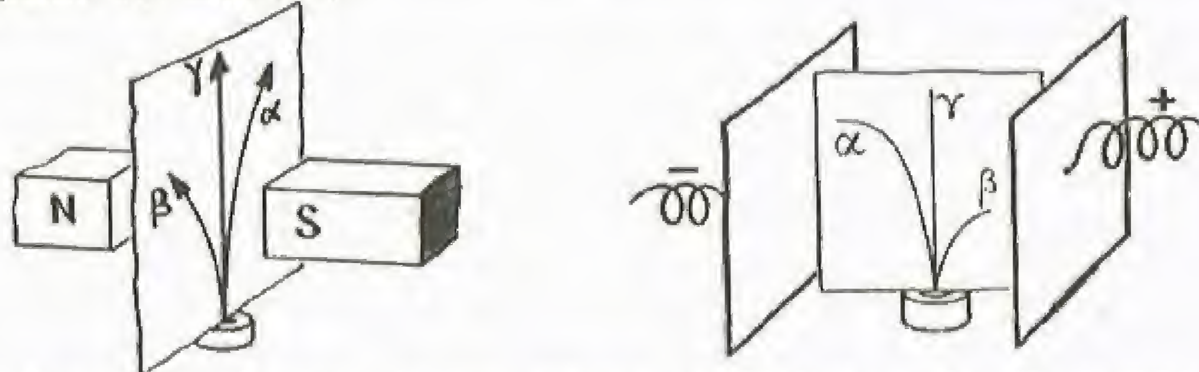


Fig. 568.—Acción de un campo magnético y de un campo eléctrico sobre los rayos α β y γ

Por otra parte, se comprueba que los rayos α emitidos por un miligramo de radio transportan $4{,}2 10^{-12}$ u. e. m. de cantidad de electricidad por segundo. La carga de una partícula es, por consiguiente:

$$e = \frac{4{,}2 10^{-12}}{140 \cdot 10^{6}} = 3 \cdot 10^{-20} \text{ u. e. m.};$$

esta carga es, teniendo en cuenta los errores de orden experimental, el doble de la carga elemental del electrón $1{,}55 \cdot 10^{-20}$ u. e. m.

La masa de la partícula α es, por consiguiente:

$$m = \frac{3 \cdot 10^{-20}}{4\,800} = 0{,}62 \cdot 10^{-23} \text{ gramo};$$

esta masa es precisamente la del átomo de helio, que es igual en efecto a (He = 4, N = $6 \cdot 10^{-23}$);

$$\frac{4}{6 \cdot 10^{23}} = 0{,}66 \cdot 10^{-23}.$$

Si recordamos que el átomo de helio se considera formado por un núcleo alrededor del cual gravitan dos electrones (v. p. 163), parece evidente que *la partícula α no es más que el núcleo del átomo de helio*. Este núcleo, al fijar dos electrones, puede transformarse en helio lo que comprobó **Rutherford.** Como sabemos el número de partículas emitidas por segundo por un peso dado de radio, y como, por otra parte, podemos medir el volumen del helio formado al cabo de cierto tiempo, podemos calcular el número de átomos de helio contenidos en el volumen molecular 22¹,4, es decir, el **número de Avogadro;** de esta forma se obtiene: N = 6×10^{23}, lo que está de acuerdo con los valores encontrados por otros métodos.

Trayectorias de las partículas α. — **C. T. R. Wilson** fotografió las trayectorias de las partículas α utilizando el aparato que lleva su nombre y que se ha descrito anteriormente. La marcha de la experiencia de Wilson es la siguiente: se introduce en el aparato una cantidad pequeña de substancia radiactiva; una fracción de segundo después de la expansión que provoca la sobresaturación del vapor del agua, se la ilumina por una fuerte chispa eléctrica.



Fig. 569

La figura 569 es una fotografía de las trayectorias de las partículas α; estas trayectorias se terminan siempre por un corchete. Su longitud en el aire, a la presión atmosférica, varía según el elemento

radiactivo considerado, y es del orden de algunos centímetros. El cálculo demuestra que, durante este corto trayecto, una partícula α ioniza por lo menos 200 000 moléculas gaseosas, lo que permite comprender que una millonésima de miligramo de radio pueda detectarse por su radiactividad, ya que produce unas decenas de millones de iones por segundo.

Rayos β. — Las determinaciones de la velocidad y el cociente $\frac{e}{m}$ para los rayos β han dado los resultados siguientes:

1º Un elemento radiactivo dado emite partículas β de velocidades muy diferentes. Estas velocidades son enormes y oscilan entre 120 000 y 299 000 kilómetros por segundo;

2º El cociente $\frac{e}{m}$ es el que caracteriza el electrón. Los rayos β son, por consiguiente, electrones animados de grandes velocidades; estas velocidades los hacen mucho más penetrantes que los rayos α, y algunos de ellos pueden atravesar capas de aluminio de varios milímetros de espesor.

Las partículas β no producen centelleo en una pantalla de sulfuro de cinc, pero provocan la ionización de los gases, de forma que se han podido fotografiar sus trayectorias. Estas trayectorias son curvas, y por consiguiente los electrones son desviados por los átomos que atraviesan, inversamente de lo que sucede en los rayos α.

Rayos γ. — Los rayos γ son en extremo penetrantes, pudiendo atravesar algunos de ellos placas de plomo de 22 centímetros de espesor. Sus longitudes de onda, medidas por difracción cristalina, para los más grandes, y por el método de los espectros corpusculares, son extraordinariamente pequeñas; oscilan entre centésimas y milésimas de angstrœms, es decir, entre una milmillonésima y una diezmilmillonésima de milímetro.

Actualmente se considera que los rayos γ son producidos en parte por el choque de los rayos β con los átomos del elemento radiactivo.

Calor desprendido por los elementos radiactivos. — Las partículas α y β poseen energía cinética que se transforma en calor cuando son detenidas por un obstáculo. Si, pues, se encierra una materia radiactiva en un recipiente, éste debe calentarse; efectivamente, se comprueba que un gramo de radio desprende 132 calorías por hora. El cálculo muestra, además, que la mayor parte de esta energía procede de las partículas α, cuya masa es relativamente grande.

Trasmutaciónes radiactivas

Emanación del radio. — Una sal de radio recién preparada sólo emite rayos α; al cabo de cierto tiempo, emite rayos β y rayos γ. Se ha supuesto, pues, que el radio puro emite sólo rayos α y que se transforma en otro elemento, *emanación*, que es el que emite los rayos β y γ. Este elemento ha podido aislarse de la forma siguiente: una corriente de aire atraviesa una sal de radio, y después un recipiente refrigerado por aire líquido: entonces, la emanación se condensa. Es un gas que se liquida a — 71° C a la presión atmosférica; su masa atómica es 222 (la del radio es 226) y sus propiedades químicas lo emparentan con los gases monoatómicos, es decir, con el helio, el neón, etc.; por consiguiente, es un cuerpo inerte. A la emanación del radio se le da el nombre de *radón*, cuyo símbolo es Rn.

En definitiva, el radio puro emite núcleos de helio y átomos de radón, llevando los primeros 2 cargas positivas elementales, y los segundos 2 cargas negativas elementales. El núcleo de helio captará 2 electrones y se transformará en helio. Los átomos de radón electrizados emitirán partículas β y se harán neutros. El radio Ra = 226 se transforma, por consiguiente, en helio He = 4 y en radón, Rn = 222; este hecho constituye una *transmutación química*, que está en contradicción con la ley de conservación de los elementos.

Período de un cuerpo radiactivo. — El radón se transforma a su vez, emitiendo una radiación radiactiva; al cabo de 3,83 días, una cantidad cualquiera de emanación se reduce a la mitad; al cabo del mismo tiempo, se reduce todavía la mitad, y en un mes la emanación ha desaparecido. Si, en el instante inicial, existían p_0 átomos de radón, transcurrido el tiempo t quedarán sólo p, pudiendo expresarse la ley de desaparición mediante la fórmula: $p = \frac{p_0}{e^{\lambda T}}$, en la cual, e = = 2,718 281 828... y λ es una constante llamada constante radiactiva. El tiempo necesario para que desaparezca la mitad de la emanación se llama período, y está expresado por la fórmula

$$\frac{p^0}{e^{\lambda T}} = \frac{p_0}{2},$$

de donde

$$e^{\lambda T} = 2,$$

o sea

$$\lambda T = 0{,}693.$$

Todos los elementos radiactivos satisfacen esta ley; todos tienen una constante radiactiva λ y un período T que se obtiene por la fórmula $\lambda T = 0{,}693$.

Los períodos de los elementos radiactivos oscilan entre una millonésima de segundo y cinco mil millones de años. Veamos a continuación cómo pueden medirse tales períodos.

Cálculo del período de un cuerpo radiactivo. — Consideremos una sal de radio en un recipiente cerrado y supongamos que en un instante dado haya p_0 átomos de radio y p'_0 átomos de emanación; al cabo de cierto tiempo t se han producido p'_1 átomos de emanación por transformación y han desaparecido p'_2. Llega un momento en que se produce, por segundo, tanto radón como se destruye, es decir, se llega al equilibrio y la cantidad de emanación permanece constante; el cálculo muestra entonces que

$$\frac{p'_3}{p_3} = \frac{\lambda}{\lambda'} = \frac{T}{T'},$$

donde p_3 y p'_3 son los números de átomos de radio y de emanación en presencia, λ y λ' las contantes radiactivas, T y T' los períodos. Las cantidades p_3 y p'_3 se calculan fácilmente pesándolas, para el radio, y por una medida de volumen, para la emanación. Se encuentra de esta forma que el período del radio es de 1670 años, es decir, que al cabo de 1670 años habrá desaparecido la mitad de una cantidad dada de radio. El número de átomos que desaparece en un año es 1 p. 250, y por segundo, un átomo de cada $7{,}9.10^{10}$, lo que parece ínfimo, pero teniendo en cuenta que un miligramo de radio contiene $2{,}8.10^{18}$ átomos, se destruyen 35 millones de átomos por segundo.

Ya hemos visto que estas "explosiones de átomo" liberaban una energía que, por hora y por gramo, equivalía a 132 calorías; en un año, un gramo de radio proporciona 132 × 24 × 365 = 1 150 000 calorías, y esta energía calorífica es liberada por la destrucción de $\frac{1}{2\,500}$ gramos de radio; de ello se deduce que un gramo de radio al desagregarse produciría tres mil millones de calorías, que es la cantidad de calor que producen 400 kilogramos de carbón. Ello da una idea de las reservas de energía que constituyen los elementos radiactivos; desgraciadamente es imposible aprovecharla, ya que no podemos retardar ni acelerar las transmutaciones radiactivas.

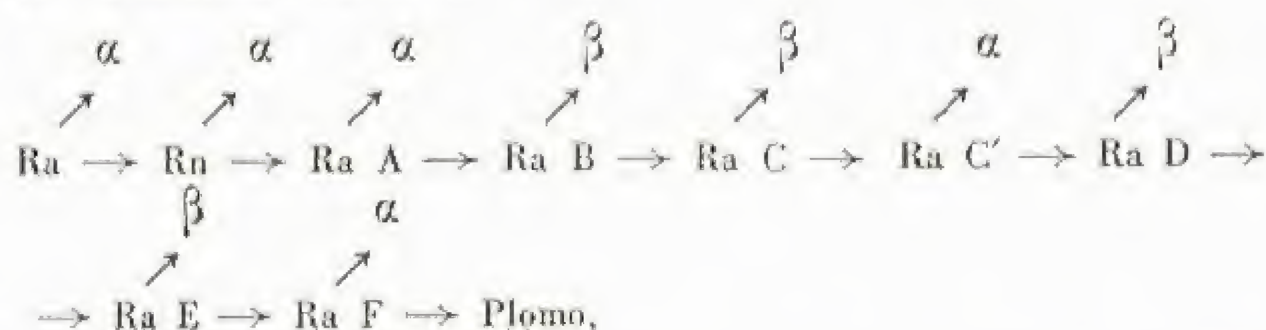
Origen del radio y edad de los minerales. — Como el período del radio es de 1670 años, este elemento debería desaparecer al cabo de, aproximadamente, 12 000 años, y no debería quedar nada sobre la tierra si no se formase nuevamente. El físico **Soddy** demostró que el radio era un producto de transformación del uranio; para ello preparó una sal de uranio rigurosamente pura y comprobó, al cabo de varios años, que la sal había emitido emanación. De hecho, los minerales que contienen radio contienen siempre uranio. En estos minerales se ha llegado a realizar el equilibrio entre ambos elementos, por lo que se ha deducido que el período del uranio, calculado a partir del de radio, es de cinco mil millones de años.

Se ha llegado incluso a deducir de las proporciones de uranio, de helio y de plomo (producto final de las transmutaciones radiactivas) contenidas en un mineral, la edad de dicho mineral; para los minerales viejos, esta edad asciende a 1 600 millones de años.

Recientemente se ha perfeccionado este tipo de medidas de las edades geológicas, o incluso prehistóricas, utilizando elementos radiactivos diferentes del radio y el uranio. El isótopo radiactivo del carbono, que se produce continuamente por acción de la radiación cósmica, ha permitido obtener con bastante exactitud la fecha de los fósiles.

Descendencia radiactiva. — La emanación del radio es un producto radiactivo que se transforma en otros elementos radiactivos, los cuales se depositan en las paredes del recipiente que contiene la emanación. Por eso es por lo que las paredes de este recipiente poseen propiedades radiactivas, y se dice que existe *radiactividad inducida*. Ésta desaparece espontáneamente en un período de una media hora.

Se han podido caracterizar los diversos elementos de la transmutación del radio, representándose la *descendencia radiactiva del radio* por el siguiente esquema:



en el que se indica la naturaleza de la radiación corpuscular, α o β, que acompaña las transmutaciones.

Algunos de estos productos son de períodos muy cortos; el del radio C' es de $\frac{1}{1\,000\,000}$ de segundo. El producto final es plomo de masa atómica 206, mientras que el plomo ordinario tiene una masa atómica de 207; se trata, pues, de un isótopo (v. p. 163) del plomo.

También se han establecido las filiaciones del uranio y el torio, que presentan bifurcaciones, pero cuyo producto final es siempre plomo.

Teoría de la constitución del átomo

Clasificación de Mendeleev y número atómico. — **Mendeleev** consiguió clasificar los elementos con arreglo a sus pesos atómicos crecientes, de tal forma que los cuerpos cuyas propiedades químicas son análogas aparecen de nuevo periódicamente.

Todos los cuerpos colocados en una misma columna tienen propiedades análogas. Por ejemplo, la primera columna es la de los metales alcalinos, la segunda la de los metales alcalinotérreos, etc.; la última es la de los gases raros.

En realidad, Mendeleev tuvo que hacer ciertas inversiones (por ejemplo, el argón, A = 39,91, fue colocado delante del potasio, K = 39,09)

y dejar ciertos puestos vacíos, en particular los puestos 21, 31 y 32. Pero entre 1875 y 1888 se descubrieron tres elementos, lo que constituyó una justificación notable de esta clasificación. Dichos elementos fueron el escandio, el galio y el germanio, que se colocaron naturalmente en los puestos 21, 31 y 32.

En 1925 componían la tabla 32 puestos, de los cuales había vacíos cinco.

En 1934 sólo quedaban vacíos dos puestos, los números 85 y 87, actualmente ocupados por el astato (At) y el francio (Fr). Se ha llegado incluso a obtener elementos de número atómico superior a 92, que son los llamados elementos transuránicos: el neptunio (93), el plutonio (94), el americio (95), el curio (96), el berkelio (97), el californio (98), el einstenio (99), el fermio (100), el mendelevio (101) y el nobelio (102).

Número atómico de un elemento es el número del lugar que le corresponde en la clasificación periódica.

Leyes de Soddy. — Cuando se descubrieron los elementos radiactivos, se planteó la cuestión de cómo colocarlos en la tabla de Mendeleev. El estudio de sus propiedades químicas permitió a **Soddy** establecer las siguientes leyes:

1º *Cuando una transmutación radiactiva se produce con emisión de rayos α, el elemento creado retrocede dos puestos en la clasificación y su peso atómico disminuye en 4 unidades;*

2º *Cuando una transmutación radiactiva se produce con emisión de rayos β, el elemento creado avanza un puesto en la clasificación y su peso atómico permanece invariable.*

Para aplicar estas leyes, supongamos la tabla arrollada a un cilindro; el retroceso significa en este caso ir hacia la izquierda. Por ejemplo, el radio emite una radiación α y se transforma en emanación; el radio ocupa el puesto 88, en la columna del berilio; dos columnas a la izquierda, se encuentra el puesto del helio; por consiguiente, la emanación debe colocarse, en la columna helio, en el puesto 88 — 2 = 86.

Isótopos. — Al aplicar las leyes de Soddy, se comprueba que ciertos puestos pueden contener varios elementos; por ejemplo, el 82, que es el del plomo, contiene elementos de masas atómicas 206, 207 (plomo), 208, 210, 212, 214... ¿Qué significa esto? Estos cuerpos son, sencillamente, isótopos (v. p. 154); sus propiedades químicas son *absolutamente idénticas*, y sólo difieren por sus masas atómicas y sus propiedades radiactivas, que pueden ser muy diferentes y que, por consiguiente, permiten separarlos. De ello resulta que las propiedades químicas y radiactivas están condicionadas por diferentes partes del edificio atómico.

En resumen: un mismo número atómico puede ser común a diferentes elementos de distintas masas atómicas, pero de propiedades químicas *absolutamente idénticas*, lo que justifica *a posteriori* las inversiones, como las del argón y el potasio, que se vio obligado a hacer Mendeleev en la sucesión de pesos atómicos crecientes. Lo que caracteriza un elemento desde el punto de vista químico es el númro atómico, no el peso atómico. Por eso es por lo que el polonio y el radio D, cuyas masas atómicas son 210, pero cuyos números atómicos son 84 y 82, tienen propiedades químicas tan poco análogas como las del carbono y el oxígeno.

Número de electrones planetarios. — Cuando un cuerpo emite un corpúsculo α, la carga de su núcleo disminuye dos cargas elementales y su número atómico dos unidades; cuando un elemento emite una radiación β, la carga de su núcleo aumenta una carga elemental y su número atómico una unidad. Puede establecerse, pues, la conclusión siguiente:

El número atómico define el número de cargas elementales del núcleo.

Como la carga del núcleo es la suma de las cargas de los electrones planetarios, resulta que:

El número atómico define el número de leectrones planetarios.

Tomemos un ejemplo: el número atómico del carbono es 6; posee, por consiguiente, 6 electrones planetarios; su masa atómica es 12 y la carga de su núcleo debe ser igual a 6 cargas elementales; resulta, pues, que este núcleo está constituido por 6 protones y 6 neutrones.

Los dos isótopos del cloro de masas atómicas 35 y 37 y de número atómico común 17, tienen sus átomos constituidos por 17 electrones planetarios que gravitan alrededor de núcleos formados por 17 protones unidos respectivamente a 35 — 17 = 18 y 37 — 17 = 20 neutrones.

Se observa, pues, que dos isótopos tienen el mismo número de electrones planetarios, pero núcleos diferentes, de donde resulta que las propiedades químicas dependen de los electrones planetarios y las radiactivas del núcleo.

No se sabe nada actualmente sobre las disposiciones relativas de los protones y los neutrones; en cambio, se admite que los electrones planetarios se reparten en capas que contienen como máximo dos electrones para la primera, ocho para la segunda, 18 para la tercera y, en general, $2n$ electrones para la capa de orden n. Las filas o períodos de la tabla de Mendeleev corresponden al número de electrones de estas diferentes capas; por eso la primera fila sólo comprende dos elementos, y la segunda ocho. Después, la cuestión se complica. Se deducen fácilmente de estas consideraciones los esquemas de los átomos, algunos de los cuales reproducimos (*fig.* 570).

Se observa que los cuerpos inactivos desde el punto de vista químico son aquellos cuyas capas electrónicas están completas: el helio, con la primera capa completa; el neón, con la segunda capa; el argón, con la tercera capa, etc. Estos átomos son muy estables, y se comprende que los otros átomos se agrupen de manera que se obtengan configuraciones análogas. Por ejemplo, el flúor, que sólo tiene 7 electrones en su segunda capa, tenderá a captar un electrón. Como el litio sólo tiene precisamente un electrón, estos dos elementos se combinarán formando el fluoruro de litio FLi. Si disolvemos el cuerpo en el agua, en donde las fuerzas electrostáticas son menores que en el aire, se separan los átomos de flúor y de litio, pero con un electrón de más y un electrón de menos, respectivamente; ésta es la explicación de la formación de iones.

Análogamente, el flúor y el berilio darán un compuesto cuya fórmula es F_2 Be, etc. Podrían darse numerosos de estos ejemplos que muestran que la valencia de un cuerpo refleja el número de electrones de su capa periférica.

Es evidente que la constitución de un átomo es más compleja que lo que acabamos de describir, pero estos esquemas son, a grandes rasgos, exactos; precisaremos esto más adelante.

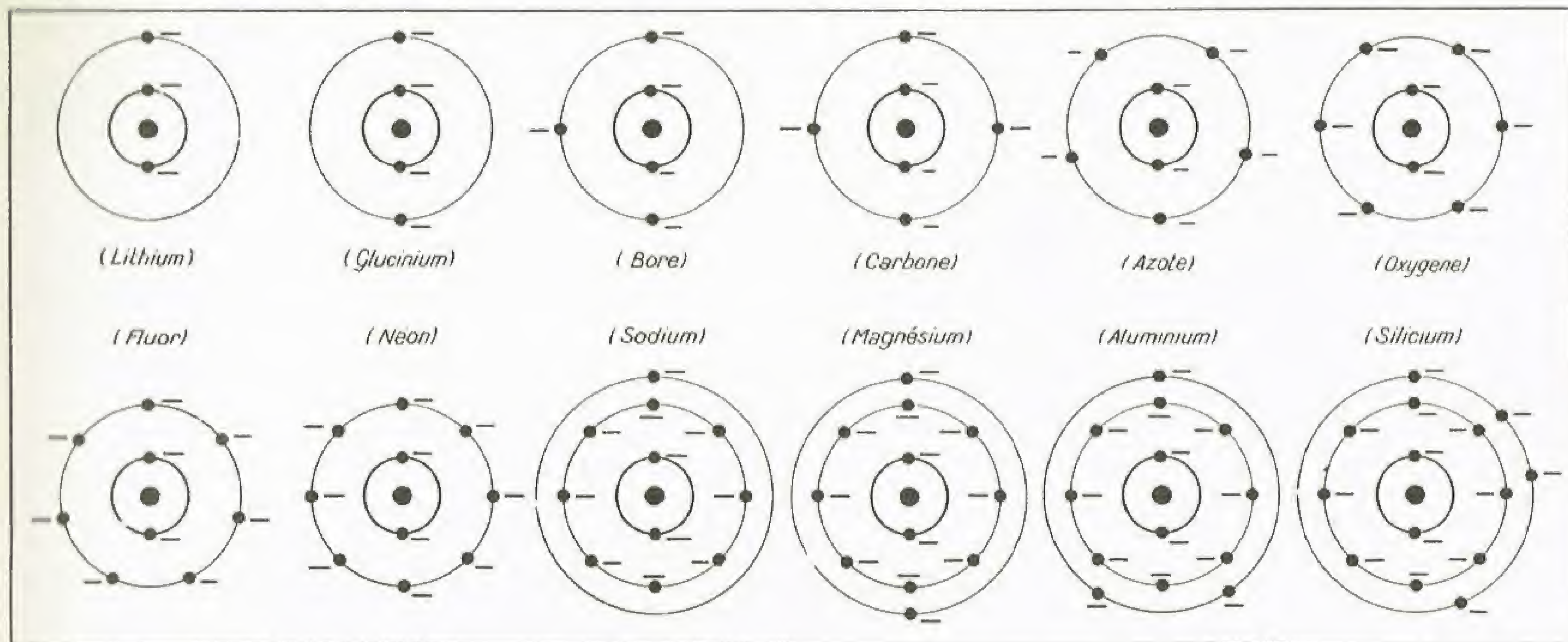


Fig. 570

Dimensiones del núcleo y del átomo. — Cuando una partícula α se aproxima al núcleo de un átomo, es rechazada, puesto que esas dos partículas están cargadas de electricidad positiva. El cálculo muestra que la trayectoria de la partícula α es una hipérbola, uno de cuyos focos es el núcleo N del átomo (*fig.* 571). La desviación AOB que sufre la partícula α puede medirse, ya que se pueden fotografiar las trayectorias de estas partículas. De la medida del ángulo $\widehat{AOB}$ se deduce la de la longitud NS, que es un límite superior del radio del núcleo. Los ángulos mayores $\widehat{AOB}$ observados son del orden de 150°, que corresponden a una distancia NS de 4.10^{-12} cm; recordemos que el radio del electrón es del orden de 10^{-13} cm.

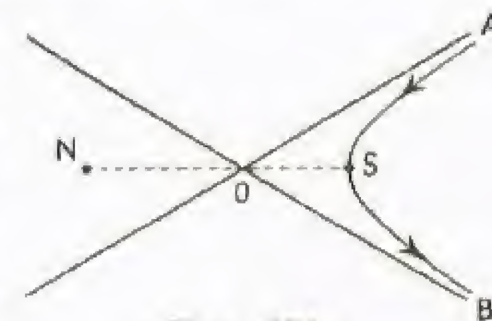


Fig. 571

Toda la masa del átomo está concentrada en el núcleo, de lo que se deduce la densidad de éste, que sería algunos centenares de miles de millones de veces mayor que la del propio cuerpo.

Puede calcularse todo el radio del átomo; sabiendo, por ejemplo, que en 22 400 cm^3 existen 6.10^{23} átomos, se encuentra una cantidad del orden de 10^{-8} cm, es decir, diez mil veces mayor que el radio del núcleo. Si, pues, se represntara un átomo por una esfera de un metro

de radio, el núcleo estaría representado por una esfera de $\frac{1}{10}$ de milímetro y los electrones por esferas de $\frac{1}{100}$ de milímetro. Esto demuestra hasta qué punto presenta lagunas la estructura de la materia y con qué facilidad una partícula α o β puede atravesar un átomo.

Experiencia de Rutherford. — Para conocer la constitución del núcleo atómico, era necesario obtener sus constituyentes. El primero que consiguió este resultado fue **Rutherford,** bombardeando ciertos cuerpos con partículas. En esta experiencia, al haber modificaciones del núcleo, hay paso de un elemento a otro, es decir, una transmutación. La experiencia de Rutherford es, pues, el primer ejemplo de una transmutación artificial.

El hidrógeno, bombardeado por partículas α, origina iones H^+, es decir, protones cuyos recorridos en el aire no exceden 30 cm. Con nitrógeno *puro* se obtienen, al contrario, partículas cuyos recorridos alcanzan 42 cm, y con el aluminio puro, 30 cm.

Las medidas de las razones $\frac{e}{m}$ de estas partículas las asimilan a los iones H^+, es decir, a los protones. No pueden proceder de hidrógeno que existiría en el nitrógeno o en el aluminio, porque:

1º En este caso los recorridos no excederían 30 cm;

2º El sentido de las trayectorias sería el de la marcha de los rayos α, lo que no sucede, puesto que se han observado trayectorias de iones H^+ cuyo sentido es inverso al de los rayos α.

Estamos, pues, obligados a admitir que bajo el choque de la partícula α los átomos de nitrógeno o de aluminio han "explotado", lanzando protones.

El fenómeno fue fotografiado por el método de C.T.R. Wilson, observándose que la partícula α se alojaba en el núcleo y que el protón era expulsado. Como la masa atómica del helión (partícula α) es 4 y la del protón 1, el átomo de nitrógeno o de aluminio se ha transformado en un elemento de masas atómicas 17 (14 — 1 + 4) y 30 (27 — 1 + 4) al mismo tiempo que la carga de sus núcleos, y por consiguiente también sus números atómicos han aumentado en 1. Los elementos así formados tienen por masas atómicas 17 y 30 y por números atómicos 8 y 14; son isótopos del oxígeno (O = 16) y del silicio (Si = 28). En la época en que Rutherford hizo esta experiencia, era imposible verificar estos resultados por el análisis químico, ya que sólo una partícula entre cinco millones provocaba la transmutación. Por consiguiente, habría sido necesario, para obtener un mm^3 de hidrógeno, que un gramo de radio actuara sobre el nitrógeno o el aluminio durante 1 000 años. Después de esa fecha las transmutaciones de la materia se efectúan con rendimientos muy superiores.

Neutrones. — El litio, el birilo, el boro, el fluor, etc., al ser bombardeados por las partículas α, emiten una radiación muy penetrante, que al principio se creyó era de la misma naturaleza que los rayos γ del radio, ya que no es desviada por el campo magnético ni por el campo eléctrico. Sin embargo, ciertas experiencias apenas pueden ser interpretadas basándose en esta hipótesis. Esta radiación, en efecto, es capaz de proyectar átomos de elementos ligeros: hidrógeno y helio. Pueden calcularse los recorridos máximos de estos átomos proyectados, en la hipótesis de que la radiación sea de origen electromagnético, y se encuentran números menores que los que han sido observados. Si, al contrario, se calcula el recorrido máximo de un átomo proyectado por un choque elástico con una partícula de masa 1 y carga nula, se encuentran números mucho más próximos a la realidad. Nos vemos, pues, obligados a admitir la existencia de estas partículas, que se han denominado neutrones.

La producción de neutrones bombardeando el berilio (o glucinio) por medio de partículas es una verdadera transmutación. El helión (núcleo de helio) se fija en el núcleo, expulsando un neutrón, y el resultado es un átomo de carbono de masa atómica 12. Se obtienen también neutrones bombardeando elementos ligeros con partículas constituidas por iones del isótopo del hidrógeno de masa 2: el deuterón. También pueden producirse por acción de la radiación del torio C sobre el isótopo de masa 2 de hidrógeno y sobre el berilio.

Como el neutrón no está cargado eléctricamente, no es rechazado por el núcleo como el protón y los iones positivos. Por este motivo las posibilidades de encuentro entre neutrones y núcleos son muy grandes, con tal que el neutrón no tenga una velocidad demasiado grande.

Se ha comprobado que la velocidad de un haz de neutrones puede disminuirse mucho más si se le hace atravesar substancias de núcleos ligeros (por ejemplo, la parafina, que contiene numerosos átomos de hidrógeno) en vez de substancias pesadas. Ello se explica fácilmente: sobre un núcleo pesado, el neutrón rebota, perdiendo muy poca energía; en cambio, si choca con un núcleo cuya masa es sensiblemente la misma que la suya, el neutrón puede comunicarle la mayor parte de su energía.

Los neutrones, moderados de esta forma, son los proyectiles más apropiados para las transmutaciones artificiales.

Se ha planteado la cuestión de saber si el neutrón es un protón unido a un electrón o si, al contrario, el protón es la suma de un neutrón y un positón. La cuestión está sin resolver; pero de ambas hipótesis, parece más verosímil la segunda.

Neutrinos. — Los neutrinos son partículas neutras hipotéticas, imaginadas primeramente por **Pauli;** posteriormente **Fermi,** a fin de explicar la distribución de las velocidades de los electrones emitidos por los cuerpos radiactivos, se basó también en la hipótesis de los neutrinos. Estas velocidades varían, en efecto, de manera continua, para un mismo elemento radiactivo, desde 0 hasta un límite superior. Existe, pues, distribución fortuita de las energías, en vez de repartirse la energía en niveles diferentes, como estamos habituados a que suceda en los fenómenos atómicos. Según Fermi, la explicación de este hecho se debería a que la emisión de eletrones por los cuerpos radiactivos procedería de la escisión de un neutrón en un protón, un electrón y un neutrino. Al repartirse el azar la energía entre el neutrino y el electrón, el primero tendría una masa del orden de la del electrón y una carga nula.

Estructura del núcleo atómico. — Como hemos visto, los dos constituyentes fundamentales del núcleo del átomo son el protón y el neutrón. En la actualidad se concuerda en que el núcleo no contiene electrones libres; los que son expulsados en forma de partículas β por las substancias radiactivas se producen en el momento mismo de la desintegración del núcleo.

La primera dificultad surge al explicar la estabilidad del núcleo atómico: las fuerzas de atracción gravitatoria son demasiado pequeñas, y las fuerzas eléctricas tienden a separar los protones unos de otros.

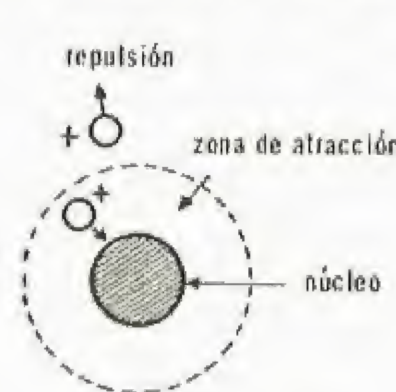


Fig. 572

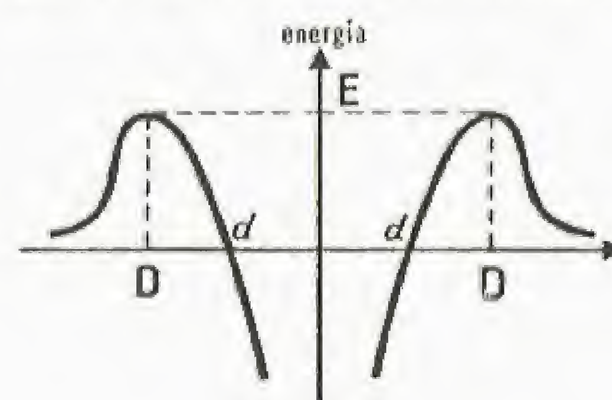


Fig. 573

Es, pues, necesario admitir que, a distancias muy pequeñas, del orden del diámetro del núcleo atómico, la ley de **Coulomb** deja de cumplirse y en vez de la repulsión eléctrica existe una atracción (*fig.* 572). Esta modificación del campo de fuerza en el espacio próximo al núcleo se debe quizás a la presencia de mesones (campo mesónico). Esto puede representarse por una curva indicando en la abscisa la distancia al centro del núcleo y en la ordenada la energía necesaria para que una partícula α, por ejemplo, llegue al punto de abscisa correspondiente. Esta curva se representa en la figura 573. Se observa en ella que, hasta una distancia D del centro del átomo, la energía crece hasta un máximo E, después disminuye, y se anula para una distancia *d*, a partir de la cual se hace negativa. En otros términos: la repulsión que ejerce el núcleo sobre una partícula electrizada positivamente crece hasta llegar a un máximo para la distancia D, después disminuye, se anula para la distancia *d*, y para distancias inferiores a *d* se cambia en una atracción. Físicamente, eso quiere decir que, para que una partícula procedente del exterior pueda alcanzar el núcleo, le hace falta una energía por lo menos igual a E. Igualmente, para que pueda abandonar el núcleo, necesita como mínimo esta misma energía. De esta forma el núcleo atómico está protegido contra las partículas procedentes del exterior o contra una "escapada" de sus propias partículas electrizadas positivamente por una muralla energética. Esta muralla se denomina la "cresta de Gamow". Así se explica la estabilidad del núcleo, pero a costa de una nueva dificultad. Las partículas α emitidas por las substancias radiactivas tienen, en efecto, una energía muy inferior a E. No se comprende cómo han podido atravesar la cresta de Gamow. También se ha llegado a bombardear núcleos con partículas α que tienen una energía inferior a E. Veremos que esta dificultad es resuelta por la mecánica ondulatoria.

El más sencillo de todos los núcleos es el del hidrógeno, que sólo tiene un protón; los elementos siguientes, hasta el calcio, contienen igual número de protones y neutrones. A medida que los elementos van siendo más pesados, los neutrones van siendo más numerosos que los protones; cuando la proporción llega a ser de tres neutrones por dos protones, el núcleo es inestable, y se está en presencia de elementos radiactivos.

El estudio de la estructura propia del núcleo atómico no ha hecho más que comenzar; es probable que neutrones y protones se distribuyan en niveles de energía, de la misma forma que los electrones planetarios.

Transmutación de la materia y radiactividad artificial

Número de masa. Transmutación provocada. Radiactividad artificial. La escisión nuclear. La bomba atómica. La fusión nuclear (bombas H). Producción y empleo de los radioelementos artificiales

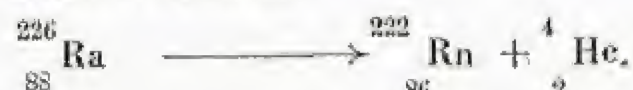
Número de masa. — Para medir las masas de los átomos, se ha considerado la masa del átomo más abundante de oxígeno como igual a 16. En estas condiciones, la masa del hidrógeno es igual a 1,008 13. Se llama *número de masa* el entero más aproximado a la masa atómica

exacta, medida considerando ${}^{16}_{8}O = 16$. Los elementos se representarán por los siguiente símbolos: ${}^{1}_{1}H$, hidrógeno; ${}^{2}_{1}H$ deuterio; ${}^{4}_{2}He$, helio; ${}^{27}_{13}Al$, aluminio; ${}^{226}_{88}Ra$, radio; ${}^{238}_{92}U$, uranio.

En la parte superior izquierda del símbolo químico ordinario se indica el número de masa, y en la parte inferior izquierda el número de la carga positiva del núcleo, que es igual, recordamos, al número del puesto que ocupa dicho elemento en la clasificación periódica de Mendeleev.

Los núcleos de los átomos están compuestos por protones y neutrones. El número atómico y el número de masa de un núcleo son, respectivamente, el número de protones y el número total de protones y neutrones que contiene.

Transmutación provocada. — Los fenómenos de la radiactividad natural constituyen las primeras pruebas indiscutibles de la transformación de elementos en elementos químicos diferentes. No hay duda que el radio se transforma espontáneamente en un gas raro activo, el radón, emitiendo heliones. Por consiguiente, se puede escribir con certeza la reacción nuclear siguiente:



$${}^{226}_{88}Ra \longrightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He.$$

Las cantidades de los diversos elementos que entran en esta reacción son suficientes para que se haya podido intentar con éxito su identificación química y espectroscópica. La serie de las transformaciones radiactivas proporciona numerosos ejemplos en los cuales las cantidades de los elementos que intervienen son muy pequeñas, imponderables; a pesar de ello, ha podido identificárseles gracias a los métodos especiales de la radioquímica. Esta química particular, en la que se manipulan a veces masas de elementos del orden de 10^{-16} gramos, ha sido posible gracias al hecho de que pueden dosificarse y seguirse, midiendo las radiaciones emitidas, los vestigios infinitesimales de materia radiactiva dispersos en el seno de las demás materias.

La serie de las transformaciones radiactivas y el examen de los valores numéricos de las masas de los diferentes núcleos ponen en evidencia que el núcleo debe estar constituido por partículas elementales cuya naturaleza y número caracterizan un núcleo determinado. Si, por un procedimiento apropiado, se llega a modificar el número o la naturaleza de las partículas que constituyen el núcleo, se habrá transformado éste en otro núcleo. El célebre físico inglés **Rutherford** tuvo la idea de utilizar los proyectiles de gran energía que emiten los radioelementos naturales para bombardear la materia, con la esperanza de provocar de esta forma transmutaciones. La primera experiencia, efectuada en 1919, fue coronada por el éxito. Bombardeando el nitrógeno con las partículas α del radio C′ —uno de los descendientes del radio—, comprobó la emisión de rayos que reconoció estaban constituidos por núcleos de hidrógeno. Como el proyectil (la partícula α o helión) y el blanco (el núcleo de nitrógeno) no contenían hidrógeno libre, dedujo que al producirse el choque íntimo del helión y el núcleo de nitrógeno éste se rompía y uno de sus constituyentes, un núcleo de hidrógeno (protón), era proyectado. El núcleo resultante tenía que ser diferente; de esta manera, Rutherford realizó por primera vez la transmutación artificial de un elemento. La posibilidad de encuentro del helión y el núcleo es muy pequeña, y es necesario enviar alrededor de un millón de heliones sobre la substancia para provocar una transmutación. El nuevo núcleo formado es estable, y es imposible identificar químicamente tan pequeña cantidad de materia. El resultado no deja por ello de ser fundamental y extremamente interesante.

El mecanismo profundo de esta transmutación ha podido emprenderse gracias a las experiencias de **Blackett,** realizadas utilizando el método de las trayectorias de la cámara de niebla de **C.T.R. Wilson.** Enviando rayos α dentro de la cámara de Wilson llena de nitrógeno, Blackett tuvo la suerte de obtener algunas fotografías que ilustran el mecanismo de la transmutación. Al producirse el choque íntimo con el núcleo de nitrógeno, la partícula α es capturada al mismo tiempo que un protón es expulsado del núcleo.

Podemos escribir una reacción nuclear análoga a las reacciones químicas bien conocidas



$${}^{14}_{7}N + {}^{4}_{2}He \longrightarrow {}^{17}_{8}O + {}^{1}_{1}H.$$

El átomo de nitrógeno debe transformarse en átomo de oxígeno.

Debe haber conservación de la carga eléctrica y de los números de masa de los núcleos:

$$7 + 2 = 8 + 1 \quad \text{y} \quad 14 + 4 = 17 + 1.$$

Los argumentos de los físicos nos inducen a creer en la realidad de este proceso. No obstante, no era posible proporcionar una prueba química de la formación de oxígeno mediante esta transmutación, por ser el número de átomos formados demasiado pequeño.

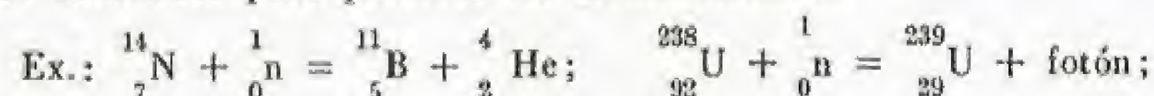
Después del descubrimiento de esta transmutación, se realizaron otras muchas con éxito, por ejemplo:



$${}^{27}_{13}Al + {}^{4}_{2}H_2 \longrightarrow {}^{30}_{14}Si + {}^{1}_{1}H.$$

Los físicos que proseguían estas investigaciones, verdaderos obreros de una obra de demolición o de construcción, consiguieron provocar numerosas transmutaciones de diversos tipos, diferentes de las que acabamos de considerar. Los rayos α no siempre provocan transmutaciones que se efectúen con emisión de núcleos de hidrógeno o de protones, sino que a veces hay emisión de neutrones (v. p. 164). Así es como el núcleo del berilio se transforma en carbono al capturar un helión, con emisión de un neutrón. Los proyectiles empleados no son siempre rayos α, sino también protones, deuterones o neutrones. Los protones y los deuterones, que los físicos proyectan sobre la materia, se producen en generadores especiales (tubos de alta tensión, ciclotrones, ciclosincrotrones, etc.) que permiten producir proyectiles transmutadores que pueden alcanzar energías cinéticas considerables. En los Estados Unidos se ha podido recientemente, por medio de un sincrotrón, producir protones con energías cinéticas del orden de dos mil millones de electrones-voltios. Puede decirse que actualmente se han provocado transmutaciones de tipos diversos de todos los núcleos de los átomos conocidos.

Los neutrones proyectiles, como carecen de carga eléctrica, penetran fácilmente en el interior de los núcleos, por lo que son los proyectiles más adecuados para provocar las transmutaciones.



$$\text{Ex.:} \quad {}^{14}_{7}N + {}^{1}_{0}n = {}^{11}_{5}B + {}^{4}_{2}He; \qquad {}^{238}_{92}U + {}^{1}_{0}n = {}^{239}_{29}U + \text{fotón};$$

el nitrógeno se transforma en boro.

Chadwick y **Goldhaber** pudieron mostrar, en 1934, que los fotones de gran energía eran capaces de provocar la transmutación del deuterio y el berilio.

Durante la transmutación, por lo general, se expulsa un neutrón del núcleo. Se ha mostrado rápidamente que la mayoría de los núcleos podían sufrir así este tipo de transmutación, llamado *fotonuclear*. En la actualidad se conoce la forma de producir rayos X de energía cuántica de varias decenas de millones de electrones-voltios, moderando en la materia la velocidad de los electrones de energías muy grandes producidos por los aceleradores de electrones del tipo betatrón.

Ciertas transmutaciones son exoenergéticas, otras, endoenergéticas. En el primer caso se observa que, después de la explosión, las partículas en movimiento poseen más energía cinética que la partícula incidente.

Este hecho puede parecer en contradicción con el principio de conservación de la energía, pero el exceso de energía encontrado después de la explosión ha sido suministrado por el núcleo transformado, cuya masa es un poco inferior a la que implicaría el principio de la conservación de la masa. Según la relación de **Einstein,** la pérdida de una masa m corresponde a una liberación de energía igual a mc^2, en donde c es la velocidad de la luz. Esta energía de condensación de masa es la que se comunica a las partículas en forma de energía cinética. En todas las reacciones nucleares se conserva la energía y la cantidad de movimiento. Estas transmutaciones exoenergéticas constituyen otro ejemplo que pone de manifiesto la gran reserva de energía utilizable existente en los núcleos.

Radiactividad artificial. — Hasta 1934 se creía que todos los tipos de transmutaciones que acabamos de citar conducían a la formación de elementos estables ordinarios, y se hicieron varias tentativas con miras a crear artificialmente la radiactividad de la materia. A principios de 1934, **Frédéric Joliot** e **Irène Curie** consiguieron mostrar que ciertos tipos de transmutaciones originaban verdaderos radioelementos que, una vez creados, se transformaban con el tiempo en elementos estables, emitiendo electrones ya positivos, ya negativos.

Tomemos un caso concreto; el del aluminio, por ejemplo, elemento con el que se hicieron las primeras experiencias. Irradiemos el aluminio con las partículas α que emite una fuente radiactiva natural, el polonio (*fig.* 574). Más de mil millones de proyectiles alcanzan, cada segundo, el aluminio, y provocan en él transmutaciones. Después de una hora de irradiación, se aleja la fuente de partículas α y se comprueba que la superficie del aluminio, primitivamente inactiva, se ha hecho activa y emite electrones positivos. Los caracteres de esta emisión son completamente análogos a los de las desintegraciones de los radioelementos naturales. Los autores midieron el período de disminución de la radiactividad, que era de tres minutos, y se pudo observar la actividad del producto más de media hora después de su formación.

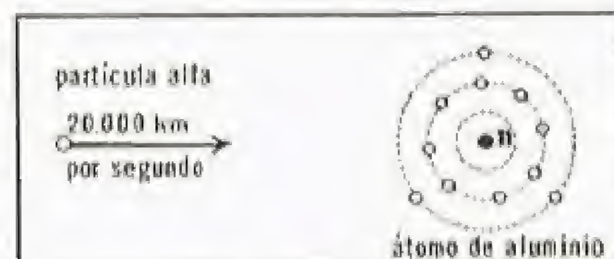
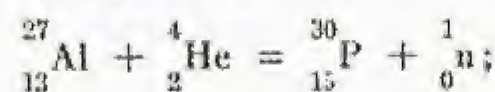


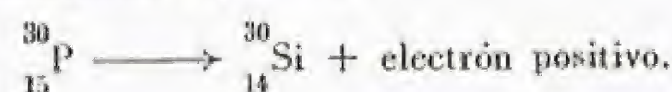
Fig. 574

La creación de este radioelemento se interpreta de la forma siguiente:
Primera transmutación provocada:



$${}^{27}_{13}Al + {}^{4}_{2}He = {}^{30}_{15}P + {}^{1}_{0}n;$$

Segunda transmutación espontánea:



$${}^{30}_{15}P \longrightarrow {}^{30}_{14}Si + \text{electrón positivo.}$$

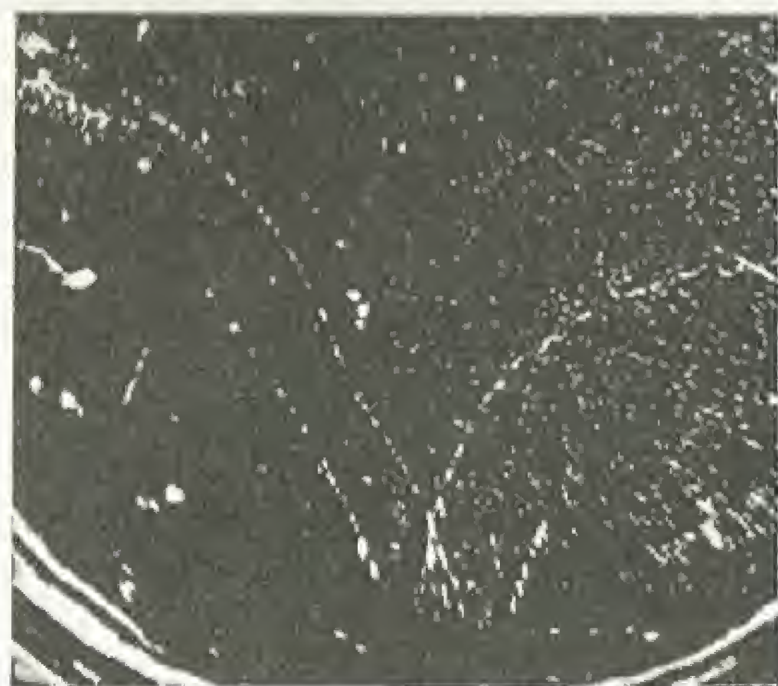
La primera transmutación instantánea origina un núcleo de fósforo radiactivo. Es un isótopo —que no existe en la naturaleza— del fósforo ordinario de masa 31. El fósforo formado se transforma después espontáneamente en silicio: ésta es la segunda fase de la transmutación, a la que sólo podemos asistir, sin poder intervenir para modificar su curso.

En el caso del boro, se forma un nitrógeno radiactivo de período diez minutos treinta segundos; mientras que, en el caso del magnesio, se forman silicio y aluminio radiactivos.

En los dos primeros casos, los autores identificaron la naturaleza química de estos elementos. Se trata, efectivamente, de un nitrógeno y un fósforo.

Se coloca en un recipiente pequeño la hoja de aluminio, previamente sometida al bombardeo. El recipiente está unido por medio de un tubo abductor a otro de vidrio cuya pared es lo suficientemente delgada para dejar pasar los electrones positivos. Se añade en el recipiente una solución de ácido clorhídrico: esta solución ataca el aluminio y se forma hidrógeno naciente, que arrastra la substancia radiactiva bajo

forma de hidrógeno fosforado al tubo de pared delgada de vidrio. La substancia radiactiva formada es diferente del aluminio, lo que proporciona una prueba química de la transmutación del aluminio. Por otra parte, en las condiciones de la experiencia, se sabe que puede formarse hidrógeno fosforado, y que es este cuerpo el que se transporta al tubo de pared delgada. La experiencia confirma la hipótesis de la formación de un fósforo. Otras experiencias del mismo género han suministrado un conjunto de pruebas que confirman las hipótesis precedentes.



electrón (−)
electrón (+)
magnesio irradiado por rayos α

Emisión de un electrón positivo y un electrón negativo por una lámina de magnesio sometida a la irradiación de rayos alfa (cada electrón provoca una condensación de vapor que puntúa su trayectoria. Bajo la acción de un campo magnético, la del electrón positivo es desviada hacia la derecha y la del electrón negativo hacia la izquierda)

Los autores propusieron que se llamara a estos nuevos radioelementos radionitrógeno y radiofósforo. Era la primera vez que se creaban elementos radiactivos que no existían en la naturaleza.

Inmediatamente después de estas primeras experiencias, podía preverse que otros proyectiles diferentes de las partículas α permitirían la creación de otros radioelementos. **Fermi** y sus colaboradores mostraron que los neutrones de muy poca velocidad permitían obtener cantidades de radioelementos mucho más importantes que las que se producían con la ayuda de proyectiles construidos por neutrones rápidos.

Se pensó inmediatamente que los radioelementos artificiales empleados como "indicadores radiactivos" permitirían emprender numerosas investigaciones en diversos dominios de la ciencia, principalmente en biología y medicina.

Estas previsiones fueron rápidamente confirmadas, y las aplicaciones de los radioelementos artificiales, llamados también *indicadores radiactivos* o *átomos marcados*, adquirieron extraordinario impulso en los laboratorios del mundo entero. Simultáneamente se desarrollaron las técnicas de preparación de haces intensos de proyectiles transmutadores que permiten crear estos nuevos radioelementos, isotopos de todas las especies de átomos contenidos en la corteza terrestre. Se sabe en la actualidad cómo producir alrededor de mil radioelementos artificiales diferentes, entre ellos algunos de número atómico superior al del uranio, último elemento de la clasificación de Mendeleev. El término medio de vida de estos radioelementos está comprendido entre una pequeña fracción de segundo y centenas de millares de años.

La escisión nuclear. — Al final del capítulo consagrado a la transmutación de la materia y a la radiactividad artificial, que redactamos en 1935 para esta misma publicación, se leían las siguientes líneas:

"Si, vueltos hacia el pasado, lanzamos una mirada sobre los progresos realizados por la ciencia a un ritmo siempre creciente, tenemos derecho a pensar que los investigadores, destruyendo o construyendo los elementos a voluntad, encontrarán el medio de realizar verdaderas transmutaciones de carácter explosivo: una transmutación traerá consigo muchas otras.

"Si tales transmutaciones llegan a propagarse en la materia, es fácil concebir la enorme liberación de energía utilizable que se producirá."

Han bastado cinco años de trabajo a los investigadores para realizar estas famosas reacciones nucleares en cadena.

Como consecuencia de numerosas investigaciones efectuadas en París, Roma y Berlín, **Hahn** y **Strassmann** llegaron a probar finalmente, a últimos de 1938, por métodos químicos, y a continuación de los trabajos de **Irène Curie** y **Savitch**, que el núcleo de uranio, después de capturar un neutrón de velocidad muy pequeña, se escinde en núcleos más ligeros, o fragmentos de escisión, cada uno de los cuales origina varios radioelementos artificiales. Este fenómeno es el que se denomina escisión nuclear.

Frisch, en Copenhague, y **Frédéric Joliot** en el Colegio de Francia, independientemente y casi simultáneamente, probaron además, desde principios de 1939, que los fragmentos emitidos durante la escisión tenían una gran energía cinética. Esta energía, unida a la de las partículas emitidas por los radioelementos formados, se cifra en 200 MeV, o sea 0,32 milésimas de ergio por átomo de uranio escindido por un neutrón. Frédéric Joliot indicó que la escisión debería ir acompañada de emisión de neutrones. **Halban, Joliot** y **Kowarski** demostraron experimentalmente, también en el Colegio de Francia, en 1939, que cada escisión va acompañada de la emisión, en promedio, de 3 neutrones, llamados "secundarios", más enérgicos que los que habían provocado la escisión.

Bohr y **Wheeler** elaboraron, en 1940, una teoría de la escisión y atribuyeron al isótopo 235 del uranio la propiedad de escindirse al capturar neutrones lentos. Esta predicción teórica fue confirmada, en la Universidad de Columbia, por **Dunning** y sus alumnos, al bombardear con neutrones un blanco de uranio 235 preparado en el separador de masas por **Nier.** Se observó, además, que la escisión se producía en dos fragmentos cualesquiera, cuya suma de cargas nucleares es igual a 92, la del núcleo del uranio, pero cuya suma de masas es inferior de 2 a 3 unidades a 235, que volvió a encontrarse en forma de neutrones secundarios. No obstante, las masas más frecuentes de estos fragmentos son cercanas a 90 y 140, y las masas extremas a 70 y 160.

Inmediatamente después de haber dado la prueba de la emisión de neutrones secundarios durante la escisión, el equipo del Colegio de Francia supuso que, si los neutrones secundarios rápidos nacidos de la primera escisión se moderan suficientemente en el seno de una gran masa de uranio, provocarán nuevas escisiones, y que si más de uno de los tres neutrones secundarios es capaz de provocar una nueva escisión, el número de escisiones aumentará en progresión geométrica. Una reacción de escisión que libere energía, implicará, pues, una cadena de reacciones de escisión; la energía liberada aumentará muy rápidamente, como la suma de los términos de una progresión geométrica de razón mayor que 1; el fenómeno tendrá un carácter explosivo si no se le frena (la energía se manifiesta bajo forma de calor en la masa de uranio y del moderador, y tiene su origen en la moderación de los fragmentos atómicos de escisión en la masa). Si se concibe el dispositivo de forma que se obtenga un flujo de energía conveniente, se tendrá un reactor o pila de uranio generador de energía de origen atómico utilizable (sería preferible decir de origen nuclear). Es sabido cómo estos dispositivos se han realizado desde entonces industrialmente.

Se había mostrado, por otra parte, que el ^{238}U que captura un neutrón se transforma en un elemento radiactivo denominado neptunio, el cual, como se demostró en América, se transforma espontáneamente en plutonio Pu, cuyo número de masa es 239. En los Estados Unidos se mostró que el ^{239}Pu se escinde, como el ^{235}U, bajo la acción de los neutrones térmicos.

En definitiva, en un reactor de uranio, las reacciones en cadena liberadora de energía consumen ^{235}U, pero una fracción de los neutrones no utilizados para producir las escisiones de este núcleo es capturada por el ^{238}U y da finalmente ^{239}Pu. Este ^{239}Pu podrá sufrir a su vez la escisión producida por los neutrones térmicos y compensar en gran parte el consumo de ^{235}U. Puede, pues, pensarse que la casi totalidad de una masa de uranio natural introducida en el reactor puede ser consumida para producir energía. En estas condiciones, el consumo de 1 kilogramo de uranio natural en el reactor libera la misma energía que el consumo de 3×10^3 toneladas de carbón. Esta comparación pone de manifiesto el porvenir de esta prodigiosa forma de energía. Puede hablarse con toda razón de una nueva era.

Un reactor "parado" por barras de cadmio continúa proporcionando energía, gracias a la acumulación de los productos radiactivos de escisión. Así, un reactor de 200 kW disipa al cabo de 24 horas de detención 1,5 kW, y al cabo de 10 días cerca de 1 kW.

Un reactor de 100 kW proporciona en su centro aproximadamente diez mil millones de neutrones por segundo y por centímetro cuadrado.

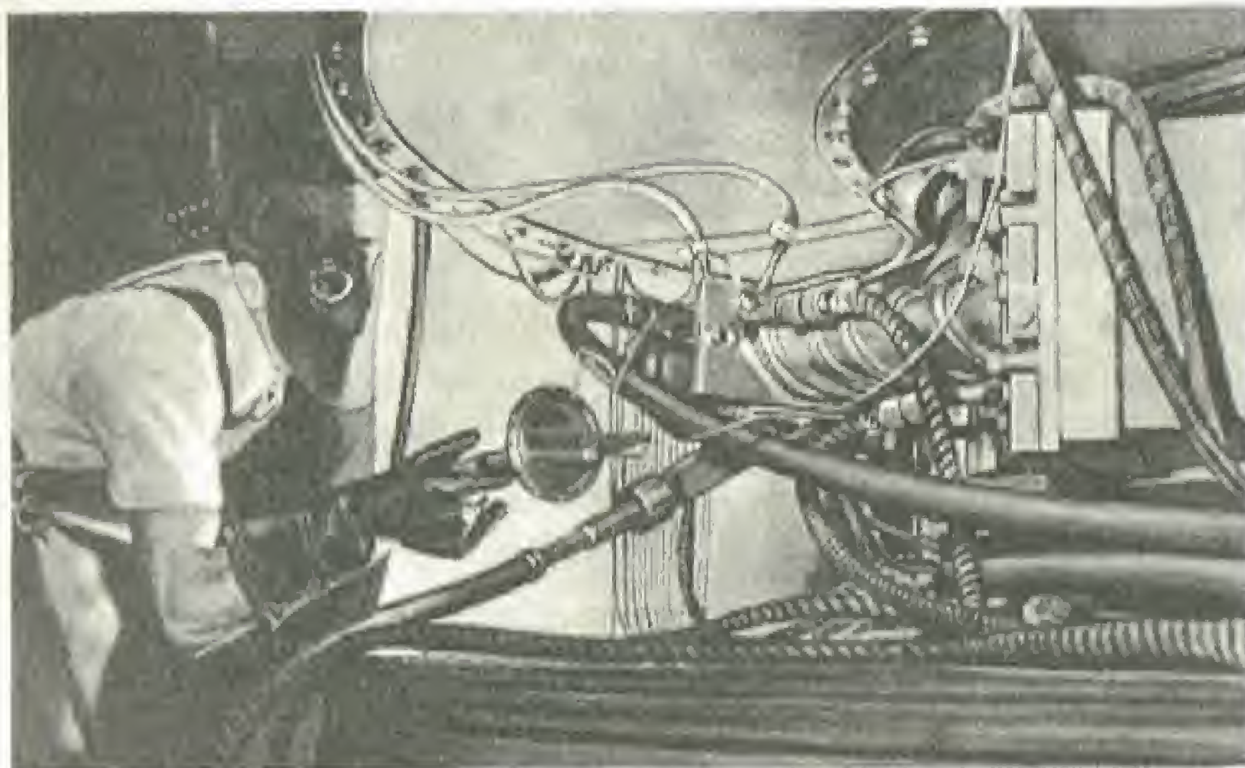
Aunque la energía de escisión sea considerable, sobre todo cuando se provoca gran número de escisiones (un átomo-gramo [235 g] de ^{235}U contiene 6.10^{23} núcleos), es despreciable en comparación con la que se obtendría si llegara a transformarse completamente en energía la masa de los núcleos atómicos. Por ejemplo, un solo núcleo de hidrógeno proporcionaría 930 MeV y un núcleo de ^{235}U cerca de 200 000 MeV, o sea mil veces más que el proceso de escisión.

La bomba atómica. — Desgraciadamente, se sabe que esta era fue inaugurada por la aplicación de la bomba atómica, causa de destrucción en masa. El uranio 235 o el plutonio 239 pueden escindirse bajo la acción de neutrones rápidos con una probabilidad bastante grande. Una cantidad de unos cuantos kilogramos de uno cualquiera de estos átomos puede, en el dispositivo de una bomba atómica, ser asiento de reacciones en cadena divergente bajo la acción de neutrones rápidos. En una pequeñísima fracción de segundo, estas reacciones adquieren carácter explosivo. La temperatura del medio puede adquirir millones de grados y originar una onda de choque terriblemente destructora y la emisión de una radiación de neutrones de una enorme acción devastadora desde el punto de vista biológico. Además, se dispersan fragmentos de escisión radiactivos que pueden también causar efectos biológicos muy nocivos.

La fusión nuclear (bombas H). — Si la escisión de un núcleo pesado en dos núcleos libera energía, se observa también que la fusión de dos núcleos ligeros es igualmente un proceso exoenergético. Para provocar una fusión de los núcleos, hay que vencer su repulsión culombiana e imprimir, por consiguiente, a estos núcleos grandes energías cinéticas. Si fuera necesario acelerar estos núcleos por medio de ciclotrones, por ejemplo, la operación sería claramente deficitaria. En

NÚCLEOS QUE INTERVIENEN EN EL CHOQUE	NÚCLEOS RESULTANTES O EXPULSADOS	ENERGÍA DESPRENDIDA DURANTE CADA FUSIÓN
^{2}H + ^{1}H	^{3}H (tritio)	6,5 MeV
^{2}H + ^{2}H	^{3}H + ^{1}H	4,1 MeV
^{2}H + ^{1}H	^{3}He	5,0 MeV
^{2}H + ^{2}H	^{3}He + n	3,2 MeV
^{1}H + ^{3}H	^{4}He	19,8 MeV
^{2}H + ^{3}H	^{4}He + n	14,6 MeV
^{3}H + ^{3}H	^{4}He + 2n	11,4 MeV
^{2}H + ^{7}Li	^{8}Be + n	16,0 MeV
^{2}H + ^{9}Be	^{10}Be + n	4,0 MeV

los astros se producen ciertamente reacciones entre núcleos ligeros, ya que en ellos la temperatura alcanza unos cuantos millones de grados, y provoca, por consiguiente, una agitación molecular capaz de imprimir grandes energías cinéticas a los núcleos. También se producirían gracias a la enorme elevación de la temperatura consecutiva a la explosión de una bomba atómica. El cuadro de la página anterior indica algunas cifras relativas a las reacciones entre los núcleos ligeros. El exceso de masa, $\triangle m$, se libera a cada reacción; le corresponde una energía $E = \triangle mc^2$ (c, velocidad de la luz). Una unidad de masa equivale a 930 MeV = 1,5 miliergio. Se calcula que la formación de una molécula-gramo (4 g o 6.10^{23} átomos) de helio por la fusión de núcleos de hidrógeno y de tritio desprendería 500 000 kW.



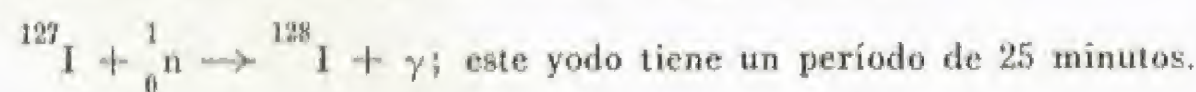
Protegido por una máscara y un delantal, el técnico retira el fósforo rojo que un potente haz de neutrones ha hecho radiactivo (*Documento U. S. I. S.*)

Teóricamente, una bomba H está constituida en el centro por una bomba atómica, que desempeña el papel de detonador destinado a elevar considerablemente la temperatura; alrededor se encuentra acumulada una gran masa de átomos ligeros adecuados. Éstos, gracias a la alta temperatura desprendida por la bomba atómica en el centro, entran en reacción y se libera bruscamente una enorme energía.

Producción y empleo de los radioelementos artificiales. — Hasta el descubrimiento, en 1939, de la bipartición o escisión del uranio y el torio por los neutrones y la elaboración posterior de los reactores de uranio, fuente de energía atómica, las cantidades de radioelementos artificiales que se podían producir eran imponderables. Las pilas o reactores de uranio permiten, mediante tratamiento químico de las barras de uranio del dispositivo, separar masas considerables de numerosos radioelementos artificiales denominados productos o radioelementos de escisión. Éstos son los fragmentos de los átomos de uranio que se dividen en dos partes.

Esas barras son las que contienen, además, elementos radiactivos artificiales transuranianos como el neptunio y el plutonio. Finalmente, el flujo muy intenso de los neutrones que salen de las pilas de uranio permite irradiar desde el exterior substancias diversas y preparar regularmente cantidades importantes de radioelementos artificiales para las aplicaciones.

Un mismo radioelemento artificial puede obtenerse con frecuencia por varias reacciones nucleares diferentes. Teniendo en cuenta las aplicaciones, distinguiremos las reacciones que conducen a la formación de un isótopo radiactivo del elemento irradiado de las que proporcionan un elemento radiactivo cuya naturaleza química es diferente del elemento que constituye el blanco. Las primeras son, en su mayoría, las que corresponden a la captura de un neutrón por el núcleo irradiado, captura que va acompañada por la emisión de fotones; es la captura llamada "radiativa", designada por el símbolo (n, γ). Ejemplo:



$${}^{127}I + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{128}I + \gamma;$$ este yodo tiene un período de 25 minutos.

Pero los neutrones son también capaces de provocar reacciones del tipo (n, p) o (n, α), que significan que la captura del neutrón trasmuta el núcleo con emisión de un protón p y de una partícula α; el radioelemento formado tendrá, esta vez, propiedades químicas diferentes de las de los átomos irradiados. Ejemplo:



$${}^{130}_{52}Te + {}^{2}_{1}D \longrightarrow {}^{131}_{53}I + {}^{1}_{0}n$$

(${}^{2}_{1}D$ = proyectil deuterón isótopo de masa 2 del hidrógeno). Este yodo ${}^{131}I$ tiene un período de ocho días y puede ser separado de la masa del telurio irradiado. Ocurre también que el radioelemento formado se desintegra dando otro radioelemento; es el caso de las filiaciones radiactivas. Los radioelementos descendientes tienen propiedades químicas diferentes de la substancia madre, y pueden ser separados de ella. Estas consideraciones son importantes para las aplicaciones, principalmente en biología, en donde se desea trabajar con un radioelemento puro y de la mayor actividad específica posible. La actividad específica puede expresarse mediante el número de rayos emitidos por unidad de tiempo en todo el espacio, por unidad de masa de la substancia utilizada, mezcla de átomos radiactivos y átomos isótopos estables. Las substancias de actividad específica muy grande se utilizan, por ejemplo, para estudios de mecanismos fisiológicos; se les da el nombre de "trazadores". Un procedimiento ingenioso de **Szilard** y **Chalmers** permite preparar trazadores en numerosos casos en que el radioelemento formado es un isótopo de los átomos de la substancia irradiada.

Ciertos radioelementos son fáciles de preparar, otros, difíciles. Es evidente, además, que los cuerpos cuyos períodos son breves, del orden de algunos minutos, son susceptibles de aplicaciones menos numerosas que los cuerpos de largo período, superior a un día. Por último, los períodos de los radioelementos que emiten radiaciones de poca energía y muy absorbibles necesitan, para que se pueda detectar su presencia, el empleo de aparatos de medida muy delicados, y la influencia de la absorción por la materia en la que se distribuyen, durante su utilización, hace su empleo más difícil; es el caso, por ejemplo, del carbono 14, de período de cinco mil años aproximadamente, que emite rayos β de energía máxima de 145 000 electrones-voltios muy absorbibles. El recorrido de estos rayos es de 2,5 décimas de milímetro, aproximadamente. Desde la construcción de los reactores de uranio y de potentes ciclotrones, los investigadores pueden fácilmente procurarse radioelementos artificiales.

Además del carbono ${}^{14}C$ ya citado, pueden obtenerse fácilmente los radioelementos siguientes, sin trazadores: ${}^{131}I$, período 8 días; ${}^{32}P$, período 14,3 días; ${}^{35}S$, período 87,1 días; ${}^{45}Ca$, período 180 días. Pueden procurarse otros muchos radioelementos, entre los cuales hay que citar el radiocobalto de período 5,3 años, fuente de rayos γ de un millón de electrones-voltio, aproximadamente, que se utiliza para las radiografías y la telecurioterapia. Pueden procurarse milicurios de estas substancias, cantidades ampliamente suficientes para la mayoría de las aplicaciones. Ciertos radioelementos, como el radiocobalto, pueden obtenerse en cantidades mucho mayores, varios centenares de curies (un "curie" es la cantidad de radioelemento que emite $3,7 \times 10^{10}$ rayos por segundo en el espacio total). Conviene observar que, para preparar ciertos radioelementos con una gran actividad específica, es a veces preferible utilizar proyectiles acelerados por un ciclotrón, en lugar de neutrones emitidos por un reactor de uranio.

Frédéric Joliot e Irène Joliot-Curie

Espectros visibles e invisibles

Estudio de las radiaciones invisibles: Existencia de las radiaciones invisibles, infrarrojas y ultravioleta. Propiedades de la radiación infrarroja. Modos de estudio de los rayos infrarrojos. Propiedades de las radiaciones ultravioleta. Modos de estudio de los rayos ultravioleta. Relación entre los diferentes espectros. Carácter corpuscular de las radiaciones electromagnéticas. Efecto Compton. — **Producción de radiaciones:** Radiación térmica. Cuerpo negro. Fórmula de Planck. Luminiscencia. Fluorescencia y fosforescencia. Fosforoscopio de Becquerel. Vapores fluorescentes. — **Estudio de los espectros:** Diversas clases de espectros. Diversos espectros de un mismo elemento. Espectro del hidrógeno. Espectro del helio ionizado. Espectros de los metales alcalinos. Espectros de los restantes elementos. Espectros de rayos X. — **Teoría cuántica de los espectros:** Niveles de energía del átomo. El átomo de hidrógeno. Espectro del átomo de helio ionizado. Órbitas elípticas. Conclusión

Estudio de las radiaciones invisibles

Existencia de las radiaciones invisibles, infrarrojas y ultravioletas. — Los rayos X y las ondas hertzianas son, como es sabido, radiaciones de naturaleza idéntica a la de la luz, de la que sólo difieren por la longitud de onda. Existen también otras radiaciones invisibles: las radiaciones infrarrojas y ultravioletas.

Formemos sobre una pantalla E el espectro de la luz solar, por medio de un prisma, y sean R (rojo) y V (violeta) los extremos de este espectro (*fig.* 575); coloquemos ahora en I, más allá de la región roja del espectro, la soldadura de un par termoeléctrico: comprobaremos que el par produce una corriente y que la soldadura se calienta. En la luz solar existen, por lo tanto, radiaciones invisibles que transportan calor y que, como las radiaciones visibles, son refractadas y dispersadas por un prisma. Estas radiaciones son las *radiaciones infrarrojas;* como acompañan la luz solar, puede suponerse

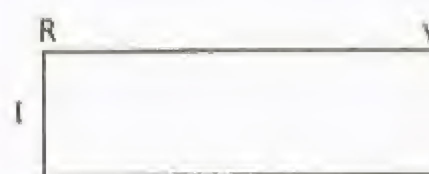


Fig. 575

que son de la misma naturaleza. Por otra parte, como son menos desviadas que la luz roja, puede pensarse que sus longitudes de onda son mayores que las de las radiaciones rojas.

Sustituyamos la pantalla E por una hoja de papel fotográfico de gelatino-bromuro de plata, y marquemos con cuidado los límites R y V del espectro visible: al revelar el papel sensible se comprueba que está impresionado más allá del límite V del espectro. Esto permite llegar a la conclusión de que existen radiaciones de longitudes de onda más cortas que las radiaciones violetas, y que impresionan la placa fotográfica: son las *radiaciones ultravioletas.*

Propiedades de la radiación infrarroja. — Las radiaciones infrarrojas no existen sólo en el espectro solar, sino que son emitidas por todos los cuerpos calientes, siendo ellas las que producen la sensación de calor que percibimos al aproximar la mano a una estufa o a un radiador de agua caliente.

Los rayos infrarrojos se propagan en el vacío: diversas experiencias lo muestran; en todo caso, se observa que los que emite el Sol nos llegan a través del vacío interplanetario.

Los rayos infrarrojos se propagan en línea recta; se utiliza esta propiedad para protegerse de una fuente calorífica demasiado intensa, interponiendo una pantalla entre dicha fuente y la persona.

La velocidad de propagación de los rayos infrarrojos es igual a la de la luz y se han podido realizar con dichos rayos todas las experiencias ópticas: reflexión, refracción y difracción. Por consiguiente, se puede llegar a la conclusión siguiente:

Las radiaciones infrarrojas son de naturaleza idéntica a la de la luz visible, de la que sólo difieren por la longitud de onda. Se las denomina también *rayos caloríficos obscuros.*

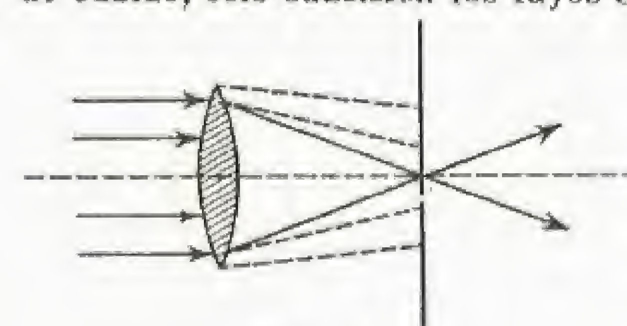
Modos de estudio de los rayos infrarrojos. — Para estudiar la radiación infrarroja es necesario:

1º Detectarla;
2º Aislar las radiaciones de diversas longitudes de onda;
3º Medir sus longitudes de onda.

Para detectar la radiación infrarroja se recurre principalmente a los pares termoeléctricos, aunque también existen otros receptores; en particular, se han llegado a obtener placas sensibles a las radiaciones de longitud de onda inferior a 10 μ. Para aislar las diversas radiaciones de una radiación infrarroja se utilizan prismas y redes como para las radiaciones visibles, y un método particular denominado método de los *rayos restantes.* El empleo de los prismas es limitado, por la poca transparencia de las materias usuales a los rayos infrarrojos. El vidrio ya no puede utilizarse para longitudes de onda superiores a 2 μ; el cuarzo permite llegar a 3 μ, la fluorina, a 8 μ, la sal gema, a 14 μ, y la silvina, a 23 μ: para longitudes de onda mayores hay que utilizar el método de los rayos restantes, aunque debe tenerse en cuenta que para longitudes de onda de más de 50 μ el cuarzo se hace transparente.

Las redes utilizadas para la radiación infrarroja son análogas a las redes ordinarias de la óptica, cuyos trazos están simplemente más espaciados (de 800 a 50 trazos por milímetro). Para evitar la absorción se utilizan estas redes por reflexión, o bien se forman con hilos finos, tensos, sobre un cuadro. Los espectros de los rayos infrarrojos son muy extensos, por lo que se superponen los espectros de diversos órdenes dados por las redes, resultando muy molesto e impidiendo la utilización de estos aparatos para longitudes de onda mayores que 20 μ.

Como los prismas y las redes no pueden utilizarse para longitudes de onda superiores a 20 μ, es necesario utilizar el método de los rayos restantes, cuyo principio es el siguiente: algunos cuerpos reflejan muy bien ciertas radiaciones, mientras que otras son reflejadas peor, fenómeno llamado de *reflexiones selectivas.* Por ejemplo, el cuarzo tiene un gran poder reflector para las radiaciones comprendidas entre 8,5 y 9,5 μ y muy poco poder para las radiaciones restantes, de forma que si se refleja varias veces un haz de infrarrojos sobre láminas de cuarzo, sólo subsisten los rayos comprendidos entre 8,5 y 9,5 μ. El yoduro de potasio permite aislar las radiaciones de longitud de onda 94 μ.


Fig. 576

Para mayores longitudes de onda, se recibe el haz infrarrojo en una lente tallada en este cristal, porque el cuarzo ya se ha hecho transparente. Los focos que corresponden a las grandes longitudes de onda están más próximos a la lente que los restantes, y entonces es fácil aislar, por medio de una pantalla, las radiaciones de grandes longitudes de onda (*fig.* 576). De esta forma ha podido llegarse a 400 μ.

La medida de las longitudes de onda se hace, como para las radiaciones visibles, por medio de redes que pueden utilizarse para todas las longitudes de onda, a condición de operar solamente con radiaciones monocromáticas.

Las longitudes de onda medidas están comprendidas entre 0,6 a 400 μ; es importante indicar que se han obtenido (Nichols y Tear) ondas hertzianas de 200 a 400 μ idénticas a los rayos infrarrojos de iguales longitudes de onda. La relación entre ambos campos de ondas puede considerarse, por consiguiente, como un hecho.

Propiedades de las radiaciones ultravioleta. — Los rayos ultravioleta se propagan, como los infrarrojos, en el vacío, y en todos los medios homogéneos, en línea recta y a la velocidad de la luz; también se reflejan, se refractan y se difractan.

Las propiedades caloríficas de los rayos ultravioletas no son muy notables; en cambio las propiedades químicas son interesantes: provocan combinaciones del hidrógeno y el cloro, del oxígeno y el hidrógeno, así como combustiones, en presencia de oxígeno, de muchos cuerpos, en particular de las materias orgánicas; también favorecen las polimerizaciones: bajo su acción, el acetileno da un polímero sólido. Como consecuencia de esta acción química, los rayos ultravioleta ejercen una acción bactericida, por lo que se les ha podido emplear para esterilizar el agua. También se utilizan en el tratamiento de ciertas afecciones cutáneas.

Modo de estudio de los rayos ultravioleta. — Para estudiar los rayos ultravioleta es necesario, como para los rayos infrarrojos:

1º Detectarlos;
2º Aislar las diversas radiaciones;
3º Medir sus longitudes de onda.

Para detectarlos se utilizan únicamente placas fotográficas. Para los rayos de longitudes de onda cortas, estas placas deben sensibilizarse de una manera especial, ya reduciendo mucho la cantidad de gelatina —placa Schumann—, ya cubriéndolas con aceite de engrase —Duclaux y Jeantet—.

Para aislar las diversas radiaciones se utilizan prismas y redes. Los prismas de vidrio permiten obtener hasta 3 500 angstrœms (0,35 μ); los de cuarzo, hasta 2 000 angstrœms, y por encima de esta longitud de onda hay que operar en el vacío, porque el aire se hace muy absorbente, y con prismas de fluorina. La región del espectro comprendida entre 1 850 y 1 200 angstrœms fue estudiada por Schumann, y lleva su nombre. Para estudiar radiaciones comprendidas entre 1 200 y 500 angstrœms (región de Lyman) y entre 500 y 90 angstrœms (región de Millikan) hay que utilizar *redes cóncavas* situadas en el vacío, tanto más perfecto cuando menor sea la longitud de onda de los rayos que haya que estudiar. Estas redes permiten al mismo tiempo la medida de las longitudes de onda.

Relación entre los diferentes espectros. — Entre los espectros infrarrojos y ultravioleta y el espectro visible no ha habido jamás discontinuidad. La había, en cambio, entre las ondas hertzianas y las infrarrojas que, como se ha visto, fue suprimida; también hemos visto que han podido producirse rayos ultravioleta de 90 angstrœms, y rayos X muy blandos de 100 angstrœms. Por consiguiente, se conocen radiaciones electromagnéticas cuyas longitudes de onda disminuyen de forma *continua,* desde varios kilómetros —ondas hertzianas— hasta una diezmilmillonésima de milímetro —rayos gamma del radio.

Carácter corpuscular de las radiaciones electromagnéticas. Efecto Compton. — El efecto fotoeléctrico nos ha mostrado que, en este fenómeno, la energía de las radiaciones es discontinua y parece concentrada en "granos" de energía igual a $h\nu$, en donde ν es la frecuencia de la radiación. Es decir, que en el efecto fotoeléctrico las radiaciones electromagnéticas se conducen como un haz de corpúsculos de energía igual a $h\nu$.

El físico Compton descubrió un segundo fenómeno aún más curioso: cuando una radiación de frecuencia elevada —rayos X— encuentra un electrón libre, este electrón se desvía de su trayectoria, como si hubiera sufrido un choque con una partícula; en cuanto a la radiación, su trayectoria también se desvía y su frecuencia disminuye. Este fenómeno es el que se denomina *efecto Compton.* Si ν es la frecuencia de la radiación incidente y ν' su frecuencia después del choque con el electrón, la energía que adquiere este último durante el choque es igual a $h\ (\nu - \nu')$. Esto no puede explicarse sino suponiendo que la energía de la radiación incidente está concentrada en una partícula, que cede una parte de la suya al chocar con el electrón: esta partícula luminosa o grano de luz ha recibido el nombre de *fotón.*

Estamos en realidad en presencia de dos teorías de las radiaciones: una exclusivamente vibratoria y otra corpuscular. Existe una contradicción manifiesta que, como veremos más adelante, será resuelta por la mecánica ondulatoria al demostrar que ambos aspectos, el vibratorio y el corpuscular, son perfectamente conciliables.

Producción de radiaciones

Como ya conocemos la forma de producir ondas hertzianas y rayos X, sólo nos queda describir los procedimientos de producción de las radiaciones visibles, infrarrojas y ultravioleta, tres tipos de radiaciones que se producen por los mismos procedimientos.

Radiación térmica. — Un cuerpo caliente emite radiaciones: a bajas temperaturas sólo se producen radiaciones infrarrojas, apareciendo después, a medida que aumenta la temperatura, las radiaciones visibles, de longitudes de onda cada vez más cortas. Así se comprueba cuando a calentar un cuerpo se observa cómo se pone rojo y luego blanco.

La radiación producida *sólo* por el calor se denomina *radiación térmica:* sus leyes son actualmente bien conocidas para un determinado cuerpo llamado *cuerpo negro.*

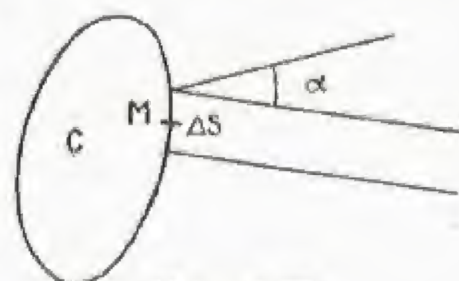


Fig. 577

Sea C un cuerpo que recibe, sobre un elemento de superficie ΔS que rodea un punto M (*fig.* 577), un haz de radiaciones de incidencia dada α, y cuyas radiaciones tienen longitudes de onda comprendidas únicamente entre límites estrechos y λ y $\lambda + d\lambda$.

Sea W la energía por segundo que aporta el haz, W_a la energía absorbida, W_r la energía reflejada y W_d la energía difundida. Se denominan *poderes absorbentes, reflector* y *difusivo* para el punto M, para la radiación λ y para la incidencia α, respectivamente, las cantidades

$$\alpha_\lambda = \frac{W_a}{W}, \quad r_\lambda = \frac{W_r}{W}, \quad d_\lambda = \frac{W_d}{W}.$$

Cuerpo negro. — *Es un cuerpo cuyo poder absorbente es igual a la unidad para todas las radiaciones y todas las incidencias.*

Se obtiene un cuerpo negro con un recinto que tenga una pequeña abertura o y cuyas paredes interiores estén ennegrecidas (*fig.* 578). Es evidente que una radiación que penetre por dicha abertura o saldrá muy debilitada, a causa de las múltiples reflexiones que sufrirá en las paredes del recinto.

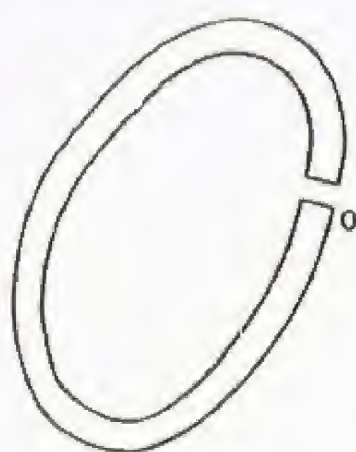


Fig. 578

Sea ahora un cuerpo C (*fig.* 579), cuyo elemento de superficie ΔS emite por segundo, en un cilindro de generatriz AA' que forma con la normal ΔS un ángulo α, una energía radiante ΔW repartida entre radiaciones cuyas longitudes de onda están comprendidas entre estrechos límites λ y $\lambda + d\lambda$. Se llama poder emisivo del elemento ΔS, para la longitud de onda λ y para la dirección AA' a la cantidad e_λ definida por

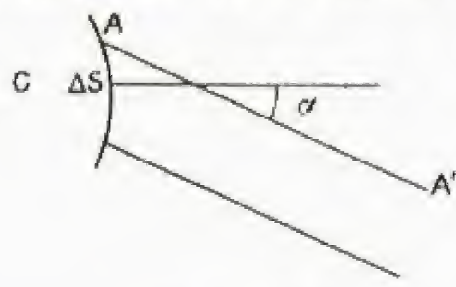


Fig. 579

$$\Delta W = e_\lambda \, d\lambda \, \Delta S \cos \alpha.$$

Ley de Kirchhoff. *El poder emisivo de un cuerpo para una radiación es igual al producto de su poder absorbente para esta radiación por el poder emisivo del cuerpo negro para dicha radiación y para la misma temperatura.* Su expresión es

$$e_\lambda = E_\lambda \times \alpha_\lambda,$$

siendo E_λ el poder emisivo del cuerpo negro. Se deduce de esta ley que:

1° El poder emisivo del cuerpo negro, en igualdad de las demás condiciones, es superior al de cuaquier otro cuerpo, porque para el cuerpo negro $a_\lambda = 1$;

2° Un cuerpo no puede emitir una radiación a una temperatura dada, por radiación puramente térmica, más que si la absorbe ($a_\lambda \neq 0$) y si, a esta misma temperatura, dicha radiación es emitida por el cuerpo negro ($E_\lambda \neq 0$).

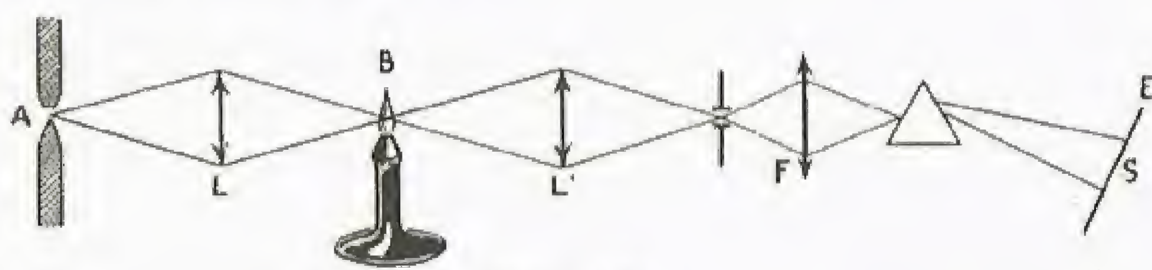


Fig. 580

La experiencia siguiente, llamada de *inversión de las rayas*, pone de manifiesto la ley de Kirchhoff (*fig.* 580).

Dos lentes L y L' dan dos imágenes sucesivas, B y F, de un arco eléctrico; en F se coloca la rendija de un espectroscopio, con lo que se obtiene sobre la pantalla E el espectro S' de la luz del arco. Entonces se coloca en B un mechero Bunsen, en cuya llama se ha vertido cloruro de sodio. Cuando la llama está apagada, se observa en S el espectro continuo del arco; al encenderla, aparecen en el espectro dos rayas negras en vez de las rayas amarillas del sodio. Si se apaga el arco, en el lugar exacto de las rayas negras aparecen las dos rayas del sodio emitidas en B: así se comprueba que la llama B que emite las rayas del sodio las absorbe.

El espectro de la luz solar contiene gran número de rayas negras, llamadas de Fraunhofer; algunas de ellas son debidas a la absorción por el vapor de agua de nuestra atmósfera, pero otras son producidas por un fenómeno análogo al de la inversión de las rayas, por lo que se ha llegado a la conclusión de que en el Sol existe gran número de cuerpor simples que ya conocíamos. Así se descubrió la existencia de helio en el Sol, antes de ser descubierto en la Tierra, y de ahí su nombre.

Ley de Stefan-Boltzmann. *La energía total que irradia por segundo un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta.* Es decir,

$$W = \sigma \, S \, T^4,$$

en donde S es la superficie radiante.

La experiencia ha confirmado plenamente esta ley, establecida por consideraciones teóricas, encontrándose para la constante σ el valor $\sigma = 5{,}72 \cdot 10^{-5}$ en unidades C. G. S.

Esta ley tiene una aplicación muy importante en la medida de la temperatura de los hornos industriales; basta, en efecto, medir W y S para obtener T. Por otra parte, aplicando la ley de Stefan a la radiación solar se ha hallado, como valor aproximado de la temperatura de este astro, 5 750 grados absolutos.

Ley de Wien. *La longitud de onda para la cual el poder emisivo del cuerpo negro es máximo varía en razón inversa de la temperatura absoluta.*

El poder emisivo máximo del cuerpo negro varía en razón directa de la quinta potencia de la temperatura absoluta. Es decir:

$$\lambda_m = \frac{b}{T}, \quad E_m = BT^5.$$

Estas dos leyes, establecidas teóricamente, fueron confirmadas por la experiencia, encontrándose $b = 2{,}885$, estando λ expresada en micras y T en grados absolutos. La longitud de onda λ_m disminuye cuando aumenta T, y no pertenece al espectro visible más que para una temperatura de 4 000°. La ley de Wien permite también calcular la temperatura del Sol; si se conoce la longitud de onda λ_m para la cual el poder emisivo es máximo, se obtiene $\lambda_m = 0{,}47$, de donde

$$T = \frac{2\,885}{0{,}47} = 6\,100° \text{ absolutos},$$

valor bastante aproximado al que da la ley de Stefan-Boltzmann.

Fórmula de Planck. — Si se toman como ordenadas los poderes emisivos E_λ del cuerpo negro, y como abscisas las longitudes de onda λ, se obtiene para cada temperatura una curva que representa la radiación del cuerpo negro. Estas curvas están representadas en la figura 581, y las coordenadas de sus máximos pueden calcularse por las leyes de Wien. Para conocer perfectamente la radiación del cuerpo negro, no obstante, es necesario hallar la ecuación de una de estas curvas, es decir, una fórmula que dé el poder emisivo E_λ para una longitud de onda λ y una temperatura T. Se intentó establecer esta fórmula por consideraciones teóricas, cuyo principio es el siguiente: se supone que las radiaciones son producidas por las oscilaciones de los átomos y que la frecuencia ν de las radiaciones es precisamente la de las oscilaciones de los átomos; cuando se calienta el cuerpo negro los átomos reciben energía, entran en oscilación y se produce emisión de radiación.

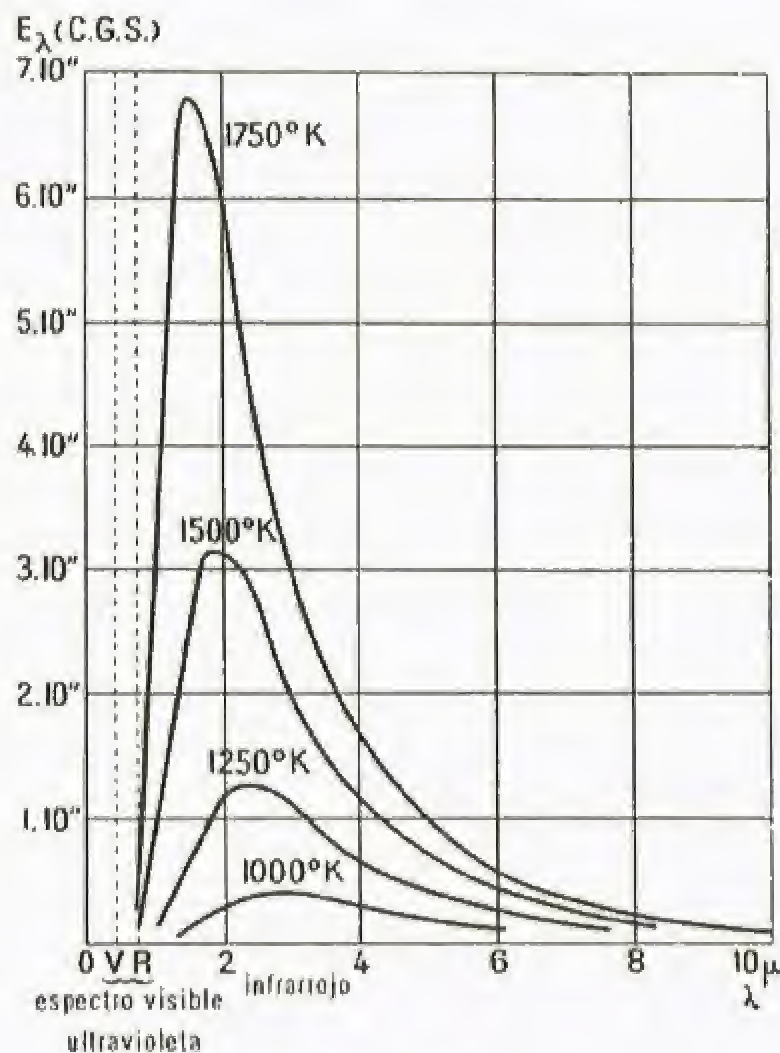


Fig. 581

Si N es el número de los osciladores, cuyas frecuencias están comprendidas entre los límites ν y $\nu + d\nu$, U su energía total y u la energía media de un oscilador, se tendrá

$$U = Nu\nu.$$

Pero la energía está distribuida al azar entre los osciladores; supongámosla dividida en partes muy pequeñas ε, que se distribuyen al azar entre los N osciladores. El cálculo de probabilidades da entonces

$$u\nu = \frac{\varepsilon}{e^{\frac{\varepsilon}{kT}} - 1},$$

siendo k una constante llamada constante de Boltzmann, T la temperatura absoluta y $e = 2{,}718\,28$ ... Si suponemos que la energía puede dividirse en partes tan pequeñas como se quiera, obtendremos el valor de $u\nu$ haciendo que ε tienda hacia cero. Se obtiene

$$u\nu = KT,$$

y como, por otra parte, se demuestra que el poder emisivo E_λ viene dado por la fórmula

$$E_\lambda = \frac{2c}{\lambda^4} u\nu,$$

donde c es la velocidad de la luz y de la que se deduce

$$E_\lambda = \frac{2c}{\lambda^4} kT,$$

que sería la ley buscada si fuese verificada por la experiencia, pero no ocurre así. Durante mucho tiempo se investigó qué error se habría cometido en el razonamiento, siendo Planck el que dio la solución al establecer que la energía no puede dividirse en partes tan pequeñas como se quiera, sino que hay un mínimo o *cuanto de energía*, cuyo valor, para la frecuencia ν, es $h\nu$, siendo h una constante universal, que él obtuvo, y denominada desde entonces *constante de Planck*. Se tendrá, pues,

$$u\nu = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1},$$

o bien, puesto que $\nu = \dfrac{c}{\lambda}$,

$$u\nu \frac{\frac{hc}{\lambda}}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1},$$

de donde se obtiene finalmente la fórmula

$$E_\lambda = 2hc^2\lambda^{-5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1},$$

que concuerda perfectamente con la experiencia.

Decíamos que se tiene

$$h = 6{,}55 \cdot 10^{-27} \text{ C. G. S. y } k = 1{,}37 \cdot 10^{-16} \text{ C. G. S.}$$

La perfecta concordancia de la fórmula de Planck con la experiencia sugirió la idea de aplicar la teoría de los cuantos a otros fenómenos. Ya hemos visto su aplicación al efecto fotoeléctrico y a los rayos X; también proporciona una notable explicación de la emisión de los rayos espectrales.

Luminiscencia. — Se dice que un cuerpo produce el fenómeno de luminiscencia cuando su radiación no obedece las leyes de la radiación puramente térmica. Puede distinguirse:

La *fotoluminiscencia*, que comprende la *fosforescencia* y la *fluorescencia*, fenómeno que presenta los cuerpos que, bajo la acción de una radiación luminosa, emiten radiaciones luminosas diferentes de la radiación excitatriz;

La *electroluminiscencia*, que se manifiesta al pasar una corriente eléctrica por un gas;

La *triboluminiscencia*, que se produce al triturar ciertas substancias;

La *quimiluminiscencia*, provocada por una reacción química, como sucede con la luminiscencia del fósforo blanco;

La *radioluminiscencia*, que se produce al actuar los rayos X o los rayos catódicos sobre ciertos cuerpos.

Estos fenómenos son bastante mal conocidos y apenas se ha esbozado su estudio. Los más conocidos son los fenómenos de fluorescencia y fosforescencia.

Fluorescencia y fosforescencia. — Cuando se ilumina fluoresceína con luz azul, emite una luz verde. El fenómeno cesa en cuanto se suprime la radiación excitatriz; se dice entonces que hay *fluorescencia*. El sulfuro de cinc calcinado con sulfuro de cobre emite, una vez iluminado con azul, radiaciones luminosas. La emisión puede persistir varios días después de la excitación y entonces se dice que hay fosforescencia; por consiguiente, queda definida la fluorescencia como una fotoluminiscencia instantánea, y la fosforescencia como una fotoluminiscencia persistente; pero se ha descubierto que la fluorescencia no era absolutamente instantánea y que ciertas fosforescencias sólo duraban unas cienmilésimas de segundo. ¿Existe, entonces, realmente una diferencia de naturaleza entre ambos fenómenos? La experiencia responde afirmativamente, ya que si se enfría suficientemente un cuerpo fosforescente previamente excitado, la emisión cesa, reanudándose al volver a calentar el cuerpo y siendo el tiempo de emisión, en igualdad de circunstancias, tanto más corto cuanto más elevada sea la temperatura. En cambio, la duración de la fluorescencia no es afectada por las variaciones de temperatura; los dos fenómenos son, pues, netamente diferentes.

Fosforoscopio de Becquerel. — El primer aparato para medir las duraciones de emisión fue construido por E. Becquerel, y se conoce con el nombre de fosforoscopio de E. Becquerel. Consiste en dos discos, montados sobre el mismo árbol, provistos de aberturas alternadas (*figura* 582); entre ambos discos se coloca la substancia que hay que estudiar, iluminando una de las caras y observando la otra. Entonces se hacen girar los discos: en un instante dado, la substancia se encuentra frente a una ventana del disco, y la fosforescencia o la fluorescencia se excita si la emisión persiste hasta que una ventana del disco no iluminado se encuentra frente a la substancia. El observador percibirá la emisión o, en caso contrario, habrá obscuridad. Es de suponer que si se hace que varíe la velocidad de rotación pueda deducirse de dicha velocidad la duración de la emisión.

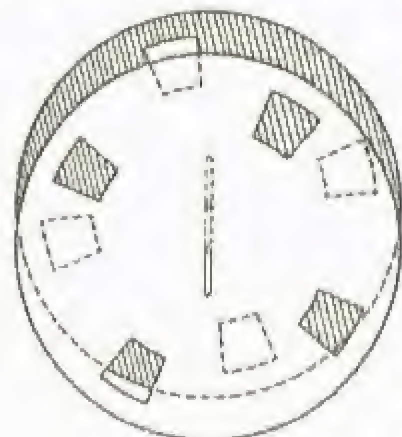


Fig. 582

Wood ideó un método que permite medir duraciones de emisión muy breves. Un disco rotatorio se cubre con la substancia que hay que estudiar, formándose sobre el disco la imagen de una fuente puntual: si la emisión es persistente, se observa un arco de círculo luminoso, cuya longitud depende de la duración de la emisión y de la velocidad de rotación del disco; si la emisión es instantánea, sólo se percibe un punto luminoso. De esta forma pueden medirse duraciones de emisión de 1/400 000 de segundo.

Ley de Stokes. En general son las radiaciones de longitudes de onda corta las que excitan la fluorescencia o la fosforescencia. La luz emitida es característica de la substancia; Stokes, en 1852, creyó poder dar a este respecto la siguiente ley:

La longitud de onda de la luz emitida es siempre mayor que la de la radiación excitatriz.

Esta ley explica inmediatamente el hecho de que las radiaciones de longitudes de onda corta exciten la fotoluminiscencia mejor que las otras; pero esta ley no es exacta y hay que reemplazarla por la siguiente:

El máximo de absorción de las radiaciones que excitan la fotoluminiscencia corresponde siempre a una longitud de onda inferior a la del máximo de emisión.



Edmond Becquerel (1820-1891)

Vapores fluorescentes. — Los vapores pueden presentar el fenómeno de fluorescencia, como sucede con el vapor de sodio. Cuando se ilumina este metal con luz blanca, emite la doble raya del sodio y se produce un fenómeno de resonancia óptica que puede asimilarse a los fenómenos análogos de la acústica. Iluminado el vapor de sodio por una sola de las rayas D, emite esta misma raya o ambas, según que la excitación se haga sobre un vapor a baja presión o a presión más elevada (1/100 de mm. de mercurio).

Estudio de los espectros

Las longitudes de onda que se miden en espectroscopia se refieren a un *patrón primario* de longitud de onda, que es la longitud de onda en el aire, a 15° de temperatura y presión de 760 mm de mercurio, de la raya roja del cadmio; vale 6 438,369 6 angstrœms. Recordemos que el angstrœm vale una diezmillonésima de milímetro, o sea una diezmilésima de micra. Para mayor comodidad en las medidas, se han definido también patrones secundarios, que son las longitudes de onda de las rayas de los espectros del hierro y del neón. Estas rayas son numerosas y cubren todo el espectro visible, así como una parte del ultravioleta.

Las leyes de los espectros se expresan con mucha sencillez cuando, en lugar de utilizar la longitud de onda λ, se utiliza la frecuencia $\nu = \dfrac{c}{\lambda}$; pero como la velocidad de la luz c no se conoce con tanta precisión como las longitudes de onda, se emplea también una cantidad proporcional a la frecuencia, que es el número de onda $\nu' = \dfrac{\nu}{c} = \dfrac{1}{\lambda}$.

Diversas clases de espectros. — El espectro de un sólido o de un líquido en estado incandescente es un *espectro continuo;* no ocurre lo mismo con los vapores, por lo menos en general. En la mayoría de los casos, un vapor emite un *espectro de rayas* o un *espectro de bandas*.

El espectro de rayas está constituido por rayas finas (radiación monocromática) repartidas por todo el espectro; la figura 583 representa los espectros de rayas del hidrógeno, del helio, del sodio y del mercurio. El espectro de bandas está formado de bandas más o menos numerosas, limitadas muy claramente por un lado, mientras que por el otro se van esfumando.

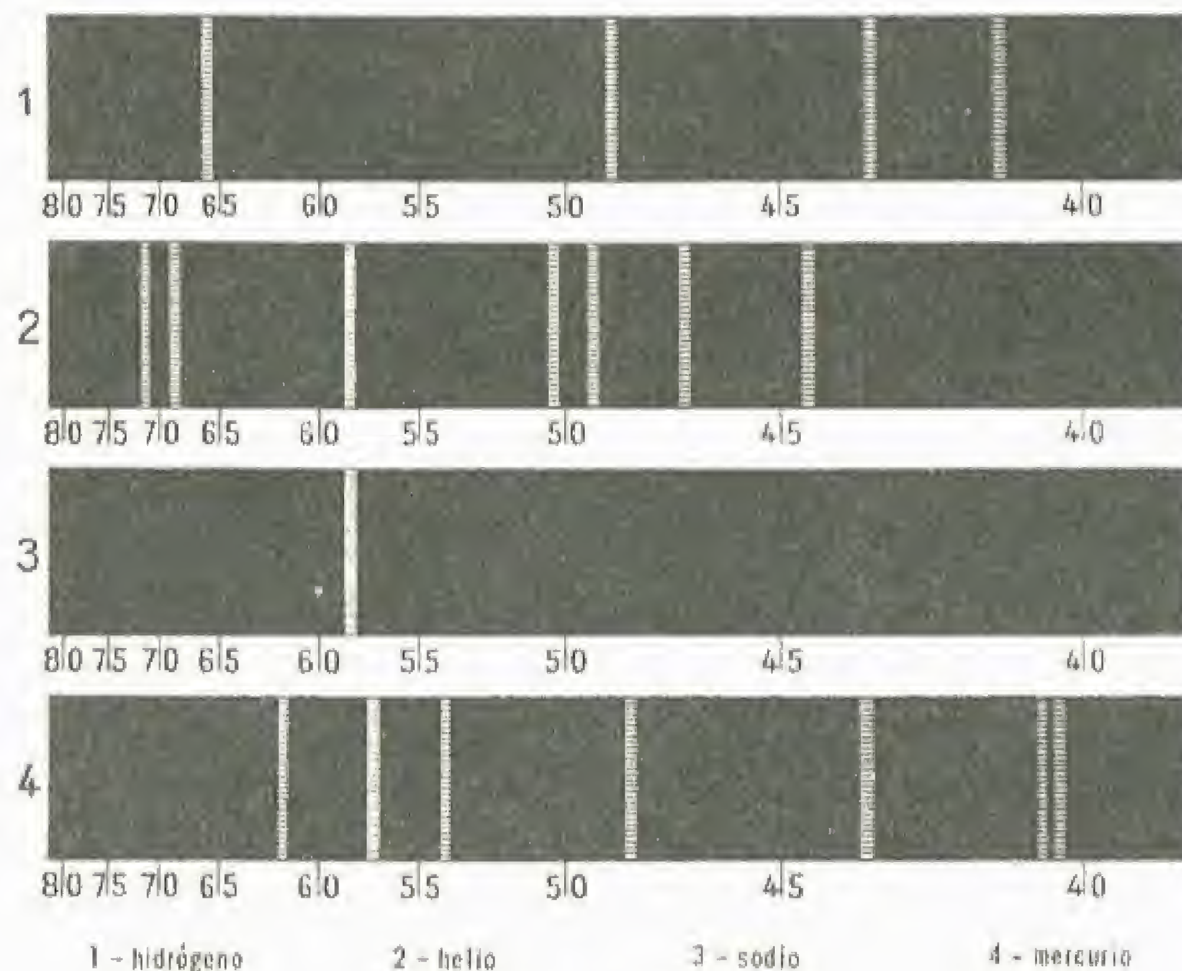


Fig. 583

En la actualidad se admite, sin que al parecer quepa duda alguna a este respecto, que los espectros de rayas son proporcionados por los *átomos* y los espectros de bandas por las *moléculas*. A medida que aumenta la temperatura, el espectro del yodo (I_2) se transforma de espectro de bandas en espectro de rayas, de acuerdo con la disociación:



$$I_2 \rightarrow 2I.$$

Diversos espectros de un mismo elemento. — Un mismo átomo puede dar diversos espectros, que se designan bajo los nombres de *espectro de arco* y *espectro de chispa*, nombres debidos a su modo de producción. Existen, de hecho, algunas *rayas de chispa* en el espectro de arco y recíprocamente. Se admite actualmente que el espectro de arco es emitido por el átomo neutro y el de chispa por el átomo que ha perdido un electrón. Si el átomo pierde un segundo electrón, emitirá un nuevo espectro de chispa llamado de segundo orden; en efecto, se conocen espectros de chispa de diversos órdenes para un mismo elemento.

Espectro del hidrógeno. — En 1858, Balmer descubrió que los números de ondas de las rayas del hidrógeno podían representarse por la fórmula $\nu' = R_H \left(\dfrac{1}{2^2} - \dfrac{1}{m^2}\right)$, llamada *fórmula de Balmer*, en la cual R_H es una constante, la constante de Rydberg, y m un

número entero. En el laboratorio han podido obtenerse 18 rayas que corresponden a los valores sucesivos de m: 3, 4, ..., 20, observándose en las estrellas las rayas correspondientes a los valores de m: 21, 22, ..., 33, y que, por consiguiente, se atribuyeron al hidrógeno.



Fig. 584

La fórmula de Balmer no es una fórmula aproximada, sino una de las más precisas de la física, y da los números de ondas de las rayas del hidrógeno con una precisión de $\frac{1}{100\,000}$. El valor de la constante R_H es 109 677,7 unidades C.G.S. Obsérvese que, en virtud de la propia forma de la fórmula, las rayas se van aproximando (*fig.* 584), ya que el término $\frac{R_H}{m^2}$ disminuye rápidamente. La serie de las rayas tiene un límite cuyo número de onda ν_e se obtiene haciendo que m tienda a infinito: se tendrá

$$\nu_e = \frac{R_H}{4} \text{ y } \lambda_e = \frac{4}{R_H} = 3\,645{,}6 \text{ angstrœms},$$

raya que se encuentra en el ultravioleta.

En 1908, el físico Ritz, observando que el primer término de la fórmula de Balmer $\frac{R_H}{2^2}$ tenía la misma forma que el segundo $\frac{R_H}{m^2}$, enunció el principio de combinación: *el átomo de hidrógeno está caracterizado por una serie de términos* $\frac{R_H}{2^2}$, $\frac{R_H}{3^2}$, etc., *y el número de ondas de una raya de este elemento es igual a la diferencia entre dos de los términos de la serie.*

En virtud de este enunciado pueden preverse rayas como

$$\nu' = R_H\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{4^2}\right) \text{ y } \nu' = R_H\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{5^2}\right),$$

que no da la fórmula de Balmer. Estas rayas fueron, en efecto, descubiertas y se las encuentra en el infrarrojo, coincidiendo sus números de ondas muy exactamente con los que dan las fórmulas anteriores.

El principio de combinación es uno de los principios esenciales de la espectroscopia, y ha sido verificado no sólo para el hidrógeno, sino para todos los elementos. Los términos $\frac{R_H}{2^2}$, $\frac{R_H}{3^2}$, etc., se denominan términos espectrales del hidrógeno. Todos los términos espectrales no pueden combinarse conjuntamente, y la finalidad de la espectroscopia es, además, de la determinación de los *términos espectrales* de los elementos, la búsqueda de las leyes con arreglo a las cuales se combinan.

Espectro del helio ionizado. — El espectro del átomo neutro de helio es bastante complejo, mientras que el del átomo ionizado es mucho más sencillo y presenta una sorprendente analogía con el del hidrógeno. Los números de ondas de las rayas del espectro del helio ionizado pueden representarse, en efecto, por la fórmula

$$\nu' = 4R_{He}\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right),$$

en la cual n y m son números enteros y R_{He} una constante muy aproximada, pero no igual, a la constante de Rydberg R_H. Se conocen las rayas que corresponden a los valores $n = 3$ y $m = 4, 5, 6, \ldots$ y $n = 4$, $m = 5, 6, 7, \ldots$, así como algunas rayas ultravioleta que corresponden a $n = 2$. Se observará que para $n = 4$ y para m par ($m = 6$, por ejemplo) se tiene

$$\nu' = 4R_{He}\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{6^2}\right) = R_{He}\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{9}\right),$$

o bien

$$\nu' = R_{He}\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}\right),$$

número de onda muy aproximado al de la raya del hidrógeno:

$$\nu' = R_H\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}\right)$$

La precisión de las medidas espectroscópicas permite, no obstante, distinguir estas dos rayas: para la primera se encuentra, en efecto, $\lambda_1 = 6\,560{,}1$ angstrœms y para la segunda $\lambda = 6\,562{,}8$ angstrœms. El valor de la constante R_{He} es 109 722,4 C.G.S., mientras el de R_H es, como ya se ha dicho, 109 677,7 C.G.S.

Espectros de los metales alcalinos. — A medida que aumenta el peso atómico, el espectro de un elemento se hace cada vez más complejo, pero los espectros de elementos que pertenecen a una misma columna de la tabla de Mendeleev son análogos, lo que demuestra que los espectros dependen, como las propiedades químicas, de los electrones periféricos del átomo. Los términos espectrales ya no pueden representarse por fórmulas tan sencillas como la de los términos espectrales del hidrógeno o el helio ionizado. Para los metales alcalinos hay cuatro tipos de términos espectrales, que se designan por las notaciones mS, mP, mD y mF:

$$mS = \frac{R}{(m+s)^2},\quad mP = \frac{R}{(m+p)^2},\quad mD = \frac{R}{(m+d)^2},\quad mF = \frac{R}{(m+f)^2},$$

en donde m es un número entero, R una constante, s, p, d, f números menores de 1, cuyos valores varían con el átomo alcalino considerado. Los números de onda se obtienen combinando, es decir, tomando la diferencia de dos términos espectrales de distinta naturaleza, pero no todas las combinaciones son posibles. Muestra la experiencia que los términos S no se combinan más que con los términos P, y los términos D con los términos P y F. Se tienen así cuatro series de rayas para los metales alcalinos, cuyos números de onda vienen dados por las siguientes fórmulas

$$\nu' = R\left(\frac{1}{(1+s)^2} - \frac{1}{(m+p)^2}\right) \text{ o } 1S - mP,$$

$$\nu' = R\left(\frac{1}{(2+p)^2} - \frac{1}{(m+d)^2}\right) \text{ o } 2P - mD,$$

$$\nu' = R\left(\frac{1}{(2+p)^2} - \frac{1}{(m+s)^2}\right) \text{ o } 2P - mS,$$

$$\nu' = R\left(\frac{1}{(3+d)^2} - \frac{1}{(m+f)^2}\right) \text{ o } 3D - mF.$$

Las rayas de las series 2 y 3 no son sencillas, sino que son dobletes análogos al que proporciona el sodio, cuyas dos rayas tienen por longitudes de onda 5 896 angstrœms y 5 890 angstrœms aproximadamente. Se comprueba que, para una misma serie, la diferencia de los números de onda entre las dos rayas de un doblete es constante, lo que obedece a que el número p puede tomar dos valores muy próximos a p_1 y p_2, de forma que existen dos términos espectrales mP:

$$mP_1 = \frac{R}{(m+p_1)^2};\qquad mP_2 = \frac{R}{(m+p_2)^2}.$$

La diferencia entre los números de onda de los dobletes de la serie 2 será entonces

$$\Delta\nu' = R\left(\frac{1}{(2+p_1)^2} - \frac{1}{(m+d)^2}\right) - R\left(\frac{1}{(2+p_2)^2} - \frac{1}{(m+d)^2}\right),$$

o

$$\Delta\nu' = R\left(\frac{1}{(2+p_1)^2} - \frac{1}{(2+p_2)^2}\right) = \text{constante}.$$

Espectros de los restantes elementos. — Entre los metales alcalinos hemos encontrado un término doble, el término mP, lo que explica la producción de dobletes. Para los metales alcalinotérreos existen dos series de términos espectrales: la primera formada de términos simples y la segunda de términos triples, lo que corresponde a la existencia de *tripletes* y de *sextupletes*. Para los demás elementos los términos siguen complicándose, cambiando de paridad las multiplicidades de los términos cuando se pasa de una columna de la tabla de Mendeleev a otra; a ello se debe el que los términos de los alcalinos sean dobles, los de los alcalinotérreos simples o triples, los de los elementos de la columna del aluminio dobles o cuádruples, etc. De esta forma se obtienen *multipletes* cada vez más complejos, algunos de los cuales comprenden hasta quince rayas.

Las rayas de los multipletes no están forzosamente próximas; así, un triplete del mercurio tiene como componentes las rayas $\lambda = 5\,461$ (verde), 4 358 (índigo), 4 047 (violeta), de forma que en el espectro de un elemento las rayas de las diversas series y de los diversos multipletes se mezclan de una forma que puede parecer inextricable. Afortunadamente, todas las rayas de una serie tienen las mismas propiedades; por ejemplo, son más o menos difusas, pero sobre todo son descompuestas de la misma forma por un campo magnético. Esta acción del campo

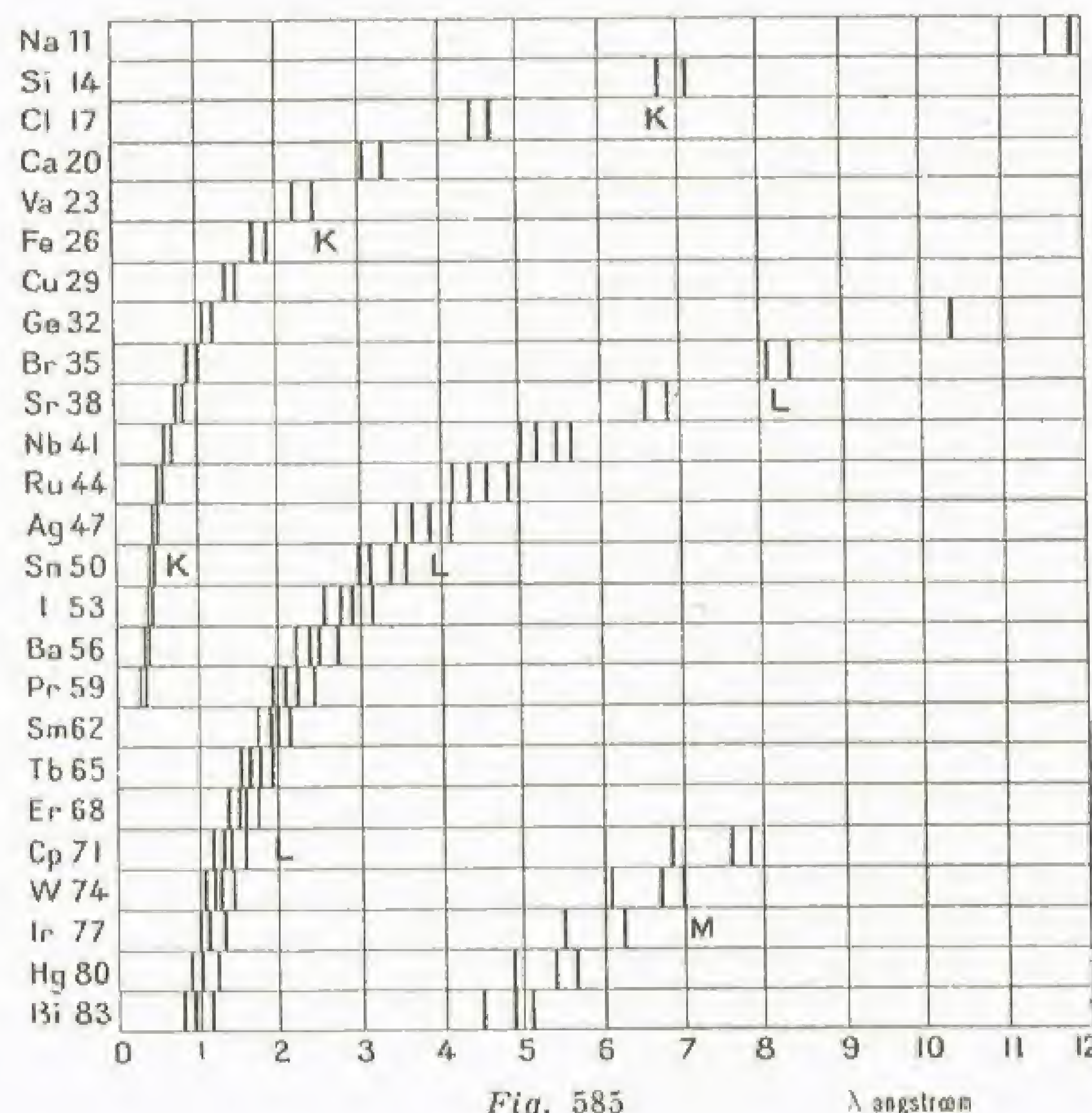


Fig. 585

magnéticos sobre las rayas, de la que no hablaremos ahora, adquiere así una importancia considerable en espectroscopia.

Espectros de rayos X. — La naturaleza de la radiación X depende de la materia de que está hecho el anticátodo y es característica de los elementos que entran en su composición. Cada elemento tiene un espectro de rayos X, de la misma forma que tiene un espectro óptico. La figura 585 representa el cuadro de las rayas X de los diversos elementos; como puede verse, es muy sencillo. Existen tres series de rayas X, que se designan por las letras K, L, M. Los elementos de poco peso atómico sólo dan rayas K, y después, para un peso atómico de 35, aparecen las rayas L, seguidas de las rayas M; añadamos que para los elementos muy pesados se conoce una cuarta serie, la serie N.

La figura 586 muestra que una misma serie comprende 2, 3 ó 4 rayas, que se designan por las notaciones $K\alpha$ $K\beta$, $L\alpha$ $L\beta$, etc. La frecuencia de una misma raya $K\alpha$, por ejemplo, aumenta cuando aumenta el número atómico. Moseley estableció la siguiente ley, que lleva su nombre:

El número de onda ν′ de una raya dada del espectro de rayos X varía, al pasar de un elemento a otro, proporcionalmente al cuadrado de los números atómicos N *de estos elementos.* Es decir,

$$\nu' = a\,RN^2,$$

donde a es una constante y R la constante de Rydberg. Esta ley no es completamente exacta, y en la actualidad se prefiere escribir

$$\nu' = a\,R\,(N - 1)^2.$$

El principio de combinación se aplica a los espectros de las rayas X, pudiendo decirse que:

El número de onda de una raya X de un elemento es igual a la diferencia entre dos términos espectrales.

Como para los espectros ópticos, el problema consiste, por consiguiente, también en este caso, en calcular los términos espectrales y en encontrar las leyes con arreglo a las cuales se combinan.

Los espectros X no presentan ninguna periodicidad, por lo cual no están en relación con los electrones de la capa periférica, sino con los de las capas internas.

Teoría cuántica de los espectros

Niveles de energía del átomo. — En la teoría clásica se suponía que la radiación emitida por un elemento era debida a las vibraciones del átomo y que los períodos de estos dos fenómenos eran los mismos; esta teoría no explicaba en absoluto el hecho de que los números de onda de las rayas emitidas por un elemento sean las diferencias entre dos términos espectrales. En 1913, el físico Bohr aplicó la teoría cuántica a la emisión de las rayas espectrales, lo que permitió inmediatamente explicar los términos espectrales, e incluso calcularlos.

Según la teoría cuántica, la emisión por un átomo de una radiación de frecuencia ν va acompañada de una pérdida de energía $W = h\,\nu$, donde h es la constante de Planck; es decir, que el átomo pasa desde un estado en que su energía era W_1 a otro en que su energía es W_2, teniéndose

$$W = h\,\nu = W_1 - W_2,$$

de donde

$$\nu' = \frac{\nu}{c} = \frac{W_1}{hc} - \frac{W_2}{hc}$$

siendo ν' el número de onda y c la velocidad de la luz. Si se admite que los términos espectrales son $\frac{W_1}{hc}$ y $\frac{W_2}{hc}$, queda inmediatamente explicada la existencia de estos últimos, así como el principio de combinación.

Como los términos espectrales forman una sucesión discontinua, debe ocurrir lo mismo a las energías W_1, W_2, ... Podrá, pues, enunciarse:

Un átomo puede existir sólo en una sucesión discontinua de estados o niveles de energía.

Mientras que el átomo permanezca en un mismo nivel de energía W_1, no emite radiación alguna, y su energía permanece constante, diciéndose que se encuentra en *estado estacionario.* Por consiguiente, puede reemplazarse el enunciado anterior por el siguiente:

La serie de estados estacionarios de un átomo es discontinua. Cuando el átomo pasa del estado W_1 al W_2 se produce la emisión de una radiación, cuyo número de onda es

$$\nu' = \frac{W_1}{hc} - \frac{W_2}{hc}.$$

Surge inmediatamente la dificultad siguiente. Se supone que el átomo está formado, como es sabido, de electrones que gravitan alrededor de un núcleo, es decir, que un electrón en movimiento puede asimilarse a una corriente eléctrica y, por consiguiente, debe crear un campo electromagnético variable e irradiar energía, cualquiera que sea su trayectoria. No deberá, pues, al parecer, existir ningún estado estacionario en el que el átomo no irradie energía; sin embargo, si el átomo emite constantemente energía, de acuerdo con la teoría clásica, resultará que su configuración no es estable, y los electrones deben aproximarse cada vez más al núcleo para acabar cayendo en él. Como no puede admitirse que el átomo no sea estable, resulta que es la teoría cuántica la que tiene razón, y no la clásica, al admitir que existen para el electrón órbitas particulares en las cuales no se produce radiación de energía, es decir, órbitas que corresponden a estados estacionarios del átomo.

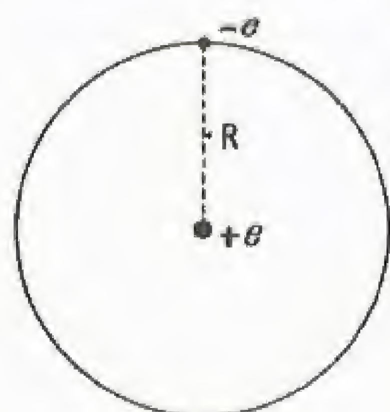


Fig. 586

¿Cómo podrán calcularse estas órbitas particulares, que son las únicas que puede recorrer el electrón?

El físico Bohr estableció *a priori* y, obligado es decirlo, arbitrariamente, que la longitud l de la órbita debe ser igual a un número entero de veces la cantidad $\frac{h}{mv}$, en donde m es la masa del electrón, v su velocidad y h la constante de Planck. Se tendrá, pues,

$$= \frac{ph}{mv}.$$

Esta condición arbitraria ha sido justificada primeramente por los resultados obtenidos y después, lógicamente, por la mecánica ondulatoria.

El átomo de hidrógeno. — Apliquemos estas hipótesis al átomo más sencillo, el átomo de hidrógeno, que, como sabemos, está constituido por un núcleo de carga $+ e$, alrededor del cual gira el electrón de carga $- e$. Supongamos que el electrón describe un círculo de radio R (*figura* 586). Como la longitud de la trayectoria es $2\pi R$, deberá tenerse

$$2\pi R = \frac{ph}{mv}.$$

Calculemos la velocidad v del electrón; la fuerza que actúa sobre él será, en virtud de la ley de Coulomb

$$f = \frac{e^2}{R^2},$$

y su aceleración

$$\gamma = \frac{v^2}{R},$$

de donde, puesto que $f = m\gamma$,

$$\frac{e^2}{R^2} = m\,\frac{v^2}{R},$$

o también

$$v^2 = \frac{e^2}{mR};$$

llevando este valor de la velocidad a la expresión del radio, se tendrá:

$$4\pi^2 R^2 = \frac{p^2 h^2 \cdot m \cdot R}{m^2 \cdot e^2},$$

de donde

$$R = p^2 \times \frac{h^2}{4\pi^2 m e^2},$$

lo que muestra que los radios sucesivos de las órbitas de un electrón son proporcionales a los cuadrados p^2 de los números enteros sucesivos.

Calculemos ahora la energía W del átomo cuando el electrón describe una órbita de radio R. Según estas hipótesis, este cálculo debe proporcionarnos los términos espectrales del hidrógeno.

La energía del átomo se compone de la energía cinética $\frac{mv^2}{2}$ del electrón y de la energía potencial del electrón de carga $-e$ en el campo creado por la masa $+ e$; esta energía es: $-e \cdot \frac{e}{R} = \frac{e^2}{1—R}$; por otra parte, las fórmulas antes establecidas dan

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2}\,\frac{e^2}{R}.$$

La energía del átomo es

$$W = \frac{1}{2}\,\frac{e^2}{R} - \frac{e^2}{R} = -\,\frac{1}{2}\,\frac{e^2}{R}.$$

Esta energía es negativa, puesto que para alejar indefinidamente el electrón del núcleo hay que efectuar un trabajo.

Sustituyendo R por su valor, se tendrá

$$W = -\,\frac{1}{2} \cdot \frac{4\pi^2 m e^4}{p^2 h^2}.$$

Cuando el electrón pasa de una órbita de orden m ($p = m$) a otra órbita de orden n ($p = n$), su energía pasa de W_1 a W_2 y se tendrá

$$W_1 - W_2 = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^2 c}\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right).$$

Se producirá entonces la emisión de una radiación de frecuencia ν, tal que

$$\nu = \frac{W_1 - W_2}{h}$$

o bien, introduciendo el número de onda ν':

$$\nu' = \frac{\nu}{c} = \frac{W_1 - W_2}{hc}$$

o

$$\nu' = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3 c}\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right),$$

que es la *fórmula de Balmer.* Queda por verificar que la cantidad $\frac{2\pi^2 m e^4}{h^3 c}$ es igual a la constante de Rydberg; este cálculo es sencillo, puesto que se conocen m, e, h y c, y se tendrá

$$\frac{2\pi^2 m e^4}{h^3 c} = 109\,000 \text{ C.G.S.}$$

Como sabemos que la constante de Rydberg vale 109 678 C.G.S., la concordancia es plenamente satisfactoria y permite afirmar la validez de las hipótesis hechas. Debe indicarse que las cantidades m, e, h y c no se conocen con gran precisión, mientras que la constante de Rydberg se conoce con una aproximación de 1/1 000 000; los valores de las cantidades e, m, h y c, pueden, pues, obtenerse, por un cálculo inverso mediante medidas espectroscópicas.

Espectro del átomo de helio ionizado. — El átomo de helio ionizado se compone de un electrón de carga $-e$ que gira alrededor de un núcleo de carga $+2e$. El cálculo, efectuado como en el caso anterior, da para los números de onda de las rayas emitidas por el átomo de helio ionizado la fórmula

$$\nu' = 4 \cdot \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3 c}\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right),$$

que coincide con la que proporciona la experiencia. Las constantes R_H, relativa al hidrógeno, y R_{He}, relativa al helio, son, como es sabido, ligeramente diferentes, a pesar de lo cual obtenemos para ambas el mismo valor $\frac{2\pi^2 m e^4}{h^3 c}$. Esto se debe a que se ha supuesto que el núcleo del átomo es inmóvil, cuando la mecánica nos enseña que esto no es exacto y que, en rigor, dicho núcleo describe también un círculo (*fig.* 587). El cálculo muestra entonces que las dos constantes R_H y R_{He} son diferentes y que ninguna de ellas es igual a

$$\frac{2\pi^2 m e^4}{h^3 c}.$$

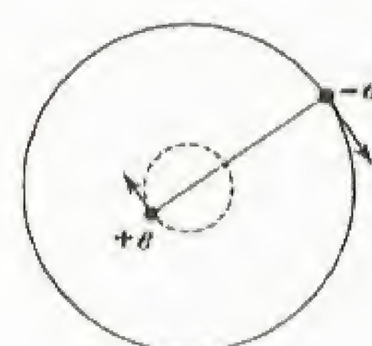


Fig. 587

Los valores que se encuentran son

$$R_H = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3 c} \cdot \frac{1}{1 + \epsilon_H}$$

y

$$R_{He} = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3 c} \cdot \frac{1}{1 + \epsilon_{He}},$$

donde ϵ_H y ϵ_{He} son las relaciones entre la masa m del electrón y las del átomo de hidrógeno y de helio, respectivamente. Como $H = 1{,}008$ y $He = 4$, se tendrá

$$\epsilon_{He} < \epsilon_H$$

y, por consiguiente,

$$R_H < R_{He},$$

lo que comprueba la experiencia: $R_H = 109\,677{,}7$ y $R_{He} = 109\,722{,}4$.

Se tiene

$$\epsilon_H = \frac{m}{1{,}008}, \quad \epsilon_{He} = \frac{m}{4},$$

de donde

$$\frac{\epsilon_{He}}{\epsilon_H} = \frac{1{,}008}{4} = 0{,}252.$$

Como

$$R_{He} = 1 + \epsilon_H = 1 + \epsilon_H$$

se deduce

$$\epsilon_H = \frac{R_{He} - R_H}{R_H - 0{,}252\, R_{He}},$$

lo que da la relación entre la masa del electrón y la masa del átomo, obteniéndose de esta manera

$$\epsilon_H = \frac{1}{1\,839}.$$

Como las constantes R_H y R_{He} se conocen con gran precisión, se obtiene de esta forma el valor más preciso de ϵ_H, del cual se deduce fácilmente el cociente $\frac{e}{m}$, encontrándose $\frac{e}{m} = 1{,}761.10^7$ u. e. m., que concuerda perfectamente con los valores que para este cociente dan los otros métodos.

Órbitas elípticas. — Hasta ahora se ha supuesto que las órbitas de los electrones eran circulares, lo que es sólo un caso muy particular. En efecto, el caso más general es aquel en que el electrón describe una elipse, lo mismo que los planetas en el sistema solar. El cálculo se hace entonces muy complicado para exponerlo en este lugar: sólo diremos que da términos espectrales de la forma $\frac{R}{(n+s)^2}$, análogos a los que proporciona la experiencia. La consideración de órbitas elípticas no explica, no obstante, la existencia de los *dobletes, tripletes*, etc.; para encontrar esta explicación hay que admitir que el electrón gira sobre sí mismo (siempre como los planetas): el cálculo muestra entonces por qué los metales alcalinos dan dobletes, los alcalinotérreos tripletes, etc.

Conclusión. — La aplicación de la teoría cuántica a los espectros ópticos, así como a los espectros de rayos X, queda, pues, perfectamente justificada, puesto que no sólo explica los fenómenos cualitativamente, sino también cuantitativamente. No es necesario insistir en la importancia de esta teoría, que, como ya hemos visto, se aplica con el mismo éxito a los fenómenos fotoeléctricos que a los rayos X y a la radiación del cuerpo negro. Conviene, no obstante, indicar que, en los cálculos anteriores, hemos utilizado simultáneamente la mecánica clásica y la teoría cuántica, que son completamente contradictorias. Si nuestros cálculos nos han dado, a pesar de ello, fórmulas exactas, no es menos cierto que, desde el punto de vista lógico, dejan mucho que desear. Louis de Broglie intentó resolver esta contradicción en su mecánica ondulatoria y lo consiguió plenamente, llegando incluso a explicar ciertos hechos que la teoría cuántica sólo interpretaba mediante hipótesis *ad hoc*.

Mecánica ondulatoria

Reseña histórica. Principios generales. Postulado fundamental. Interpretación física de la función de onda. Longitud de onda asociada a un corpúsculo. Mecánica ondulatoria y luz. Determinación de la función de onda. El «spin» o rotacional. Las órbitas electrónicas. El principio de indeterminación de Heisenberg

Reseña histórica. — **Louis de Broglie** expuso, en 1924, los principios de la mecánica ondulatoria, por la que atribuye a los electrones un carácter a la vez corpuscular y ondulatorio. En ciertos fenómenos, los electrones deben conducirse como una onda de longitud $\lambda = \frac{h}{mv}$. Estas concepciones, puramente teóricas, fueron confirmadas de manera sorprendente por las experiencias de **Davisson** y **Germer** (1927) sobre la difracción de un haz de electrones por un cristal de níquel. Después se han observado otros fenómenos de interferencia, no sólo con electrones, sino también con iones. La nueva mecánica se desarrolló rápidamente bajo el impulso de numerosos científicos eminentes, de los cuales los principales son **Schroedinger, Pauli** y **Heisenberg.** La mecánica ondulatoria ha ocasionado en nuestros conocimientos una revolución comparable a la de la teoría de la relatividad.

Principios generales. — Como hemos visto antes, la mecánica clásica no permite ya explicar los fenómenos a la escala atómica sin introducir correcciones que revisten un carácter algo arbitrario. La mecánica ondulatoria permite, partiendo de premisas sentadas como postulados, calcular las acciones recíprocas de los corpúsculos atómicos sin tener que recurrir a hipótesis arbitrarias; es decir: la mecánica ondulatoria no está en contradicción con la mecánica clásica, sino que muestra simplemente que dicha mecánica clásica constituye sólo una primera aproximación, que deja de ser válida cuando los cuerpos que se estudian tienen dimensiones atómicas.

Postulado fundamental. — El postulado fundamental de la mecánica ondulatoria es el siguiente: todo lo que puede saberse, desde el punto de vista mecánico, de un corpúsculo material, se reduce al conocimiento de una función matemática de las coordenadas del corpúsculo y del tiempo.

Esta función, que suele designarse por $\psi\,(x, y, z, t)$, donde x, y, z, son las coordenadas del corpúsculo, y t el tiempo, es una función de variable compleja, variable que, como es sabido, es de la forma

$$a + ib,$$

donde a y b son números reales e i la unidad imaginaria, que vale, como es sabido, $\sqrt{-1}$. La función ψ se llama función de onda del corpúsculo, porque recuerda por su forma la función de onda de la teoría electromagnética; esta función, que, repetimos, es de variable compleja, carece de realidad física.

Interpretación física de la función de onda. — La única interpretación física de la función de onda que puede darse es la siguiente: el cuadrado del módulo de la función de onda es igual, en un instante dado t, a la probabilidad de que el corpúsculo se encuentre en el punto de coordenadas x, y, z. Recordemos que se llama módulo de una cantidad imaginaria $a + ib$ la cantidad $\sqrt{a^2 + b^2}$.

En la mecánica ondulatoria, pues, al contrario de lo que ocurre en la mecánica clásica, no se puede en un instante dado fijar exactamente la posición de un cuerpo, sino que sólo se pueden calcular las probabilidades de su localización en los diversos puntos del espacio. Esta probabilidad puede, además, ser nula para algunos de estos puntos: en efecto, si un electrón tiene que desplazarse en cierto campo, la probabilidad para que se encuentre fuera del mismo es nula y el cuadrado del módulo de la función de onda debe ser nulo para todos los puntos exteriores al campo. Como el electrón se encuentra indudablemente en el campo, la suma de las probabilidades de su presencia en cada punto del mismo debe ser igual a 1. La función de onda debe ser satisfacer estas condiciones, denominadas *condiciones de normalización*.

Para explicar lo dicho hasta ahora, puede recurrirse a la siguiente imagen: el electrón, o cualquier otra partícula de este género, ya no

está representado en el espacio por un punto, sino por una nube, que será más o menos densa en un punto dado según que la probabilidad de la presencia del electrón en dicho punto sea mayor o menor. El contorno de la nube es el campo donde puede encontrarse el electrón. Si e es la carga de un electrón, se dirá, por ejemplo, en mecánica ondulatoria, que en el punto M hay una carga de $^1/_3$ de e, cuando la probabilidad de la presencia en M de un electrón sea igual a $^1/_3$.

Si se aplica la mecánica ondulatoria a corpúsculos que se desplazan en la vecindad de un núcleo atómico con una energía insuficiente para franquear la cresta de Gamow (v. p. 164), se encuentra que, contrariamente al resultado de la mecánica clásica, la probabilidad de que el corpúsculo franquee la cresta no es nula, lo que está de acuerdo con la experiencia. Este fenómeno se denomina "efecto de túnel", puesto que ocurre como si ciertos corpúsculos llegasen a franquear un túnel bajo la barrera energética que constituye la cresta de Gamow. Esta noción de probabilidad de que una partícula se escape del núcleo está completamente de acuerdo con el carácter estadístico de los fenómenos radiactivos.

Longitud de onda asociada a un corpúsculo. — Ya se ha dicho que la función de onda de un corpúsculo recordaba por su forma matemática, aunque solamente en esto, la función de onda que define la propagación de una onda electromagnética. De la función de onda con variables reales de la teoría electromagnética puede deducirse la longitud de onda. Si se aplica el mismo cálculo a la función de onda de un corpúsculo, se obtiene una cantidad que no contiene más que valores reales, y que es

$$\lambda = \frac{h}{mv},$$

donde h es la constante de Planck, v la velocidad del corpúsculo y m su masa. ¿Cuál es el significado físico de esta cantidad? Es la longitud de onda que delimita el campo en el cual la probabilidad de la presencia de un corpúsculo no es nula. Volviendo a la imagen anterior, puede decirse que la nube que representa para nosotros en este momento el electrón se propaga como si fuera una onda electromagnética de longitud

$$\lambda = \frac{h}{mv}.$$

En 1927, Davisson y Germer obtuvieron, proyectando un haz estrecho de electrones sobre cristales de níquel, imágenes de difracción completamente análogas a las que da en las mismas condiciones un haz estrecho de rayos X, con la sola diferencia de que la longitud de onda correspondiente era mucho más pequeña. Las medidas mostraron que esta longitud de onda era inversamente proporcional a la velocidad de los electrones y concordaba perfectamente con la fórmula, hasta entonces puramente teórica, de la mecánica ondulatoria. Desde entonces se han efectuado numerosas experiencias de difracción de electrones, que confirman de manera absoluta los resultados anteriores.

Se ha visto, además, que se podía, para el cálculo de las trayectorias de los electrones, considerarlos ya fuera como partículas o como transportados por una onda. En realidad, el cálculo es más exacto en este último caso.

Mecánica ondulatoria y luz. — Para aplicar la mecánica ondulatoria a la propagación de las ondas electromagnéticas basta con substituir el electrón por la partícula denominada fotón. La onda electromagnética clásica es la onda portadora, en cada uno de cuyos puntos existe una probabilidad no nula de encontrar un fotón; por consiguiente, desaparece la contradicción que existía entre la teoría ondulatoria de la luz y la teoría corpuscular, que en realidad no constituyen más que descripciones aproximadas del fenómeno, más o menos válidas según los casos.

Si consideramos, por ejemplo, un sistema de franjas de interferencia luminosas, cuando la teoría clásica nos indica una intensidad luminosa nula, la mecánica ondulatoria nos dice que la probabilidad de encontrar en ella un fotón es muy pequeña. En este caso sólo podrá decidirse entre ambas teorías operando con un pequeño número de fotones.

Determinación de la función de onda. — La función de onda y, de una manera general, cualquier magnitud mecánica se determinan, en mecánica ondulatoria, recurriendo a cierto automatismo matemático. Para ello se hace que a cada magnitud mecánica corresponda un operador. Si x, y, z son las coordenadas del corpúsculo, los operadores correspondientes son las multiplicaciones por x, y, z. Si v_x es la proyección de la velocidad del corpúsculo sobre el eje de las x, y m la masa del corpúsculo, se hace que a la cantidad mv_x, llamada momento conjugado con respecto a Ox, corresponda un operador que es la multiplicación por $\frac{h}{2\pi i}$ de la derivada de mv_x con respecto a x. Se escribirá entonces que el operador correspondiente a mv_x es $\frac{h}{2\pi i}\frac{\partial}{\partial x}$.

Así, partiendo de la ecuación general de la conservación de la energía

$$T + V = E,$$

en la cual T es la energía cinética, V la energía potencial y E la energía total, se llega, para determinar la función de onda, a una ecuación diferencial, es decir, a una relación entre la función y sus derivadas con respecto a las diferentes variables. Como la derivada de una constante es nula, la resolución de estas ecuaciones introduce constantes que tienen un significado físico. Por ejemplo, si suponemos que el electrón se mueve en un campo en el cual el potencial eléctrico es independiente del tiempo, la función de onda será el producto de una función de las coordenadas por una función del tiempo.

$$\psi\,(x, y, z, t) = A\,(x, y, z) \times T\,(t).$$

La función A (x, y, z) vendrá dada por la ecuación diferencial

$$\frac{d^2 A}{dx^2} + \frac{d^2 A}{dy^2} + \frac{d^2 A}{dz^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2}(E - V)\,A = 0,$$

llamada *ecuación de Schroedinger*, en la cual h es la constante de Planck, m la masa del corpúsculo, V el potencial y E una constante. Esta ecuación sólo tiene solución para ciertos valores de constante E, demostrándose que los valores de E son los valores de la energía del corpúsculo en sus estados estacionarios.

De manera general, para determinar cualquier magnitud mecánica asociada a un corpúsculo, se llegará a una ecuación de la forma

$$Af = \alpha f,$$

donde A es el operador que corresponde a la función f ( ) y α una constante. La ecuación no tendrá solución más que para ciertos valores de la constante α, valores llamados valores propios. El número de estos valores propios es restringido, y aquí se ve aparecer la discontinuidad que la teoría cuántica había introducido en los fenómenos considerados a la escala atómica.

El «spin» o rotacional. — En la determinación de la función de onda de un electrón se han considerado sólo sus coordenadas; pero para tomar también en cuenta la posibilidad que tiene este corpúsculo de girar sobre sí mismo, hay que introducir una variable complementaria, que se denomina *variable rotacional*, tomada del nombre del vector rotacional, que define el estado de rotación del electrón. Esta variable sólo puede tomar, en realidad, cuando se trata de electrones, dos valores: $-\frac{1}{2}$ y $+\frac{1}{2}$.

Las órbitas electrónicas. — El problema matemático que plantea la resolución de las ecuaciones que dan el estado mecánico del sistema formado por los electrones de un átomo que giran alrededor del núcleo, es de una gran complejidad, tanto en mecánica clásica como en mecánica ondulatoria. Hasta ahora no han podido obtenerse soluciones exactas y totales, aunque pueden calcularse ciertos resultados.

En el curso de estos cálculos se establece la función propia de las coordenadas del electrón partiendo de los valores posibles de la energía del corpúsculo y apoyándose, además, en el *principio de exclusión* de Pauli: *dos electrones de un mismo sistema no pueden encontrarse en un mismo estado.*

Así se vuelven a encontrar las diferentes capas de electrones de la clasificación periódica de Mendeleev, demostrándose, además, que las longitudes de las órbitas electrónicas son iguales a un número entero de veces la longitud de onda asociada. Es decir, que si l es la longitud de la onda, se tendrá necesariamente $l = \frac{ph}{mv}$, que es la condición que Bohr tuvo que imponer arbitrariamente para volver a encontrar las leyes de las emisiones espectrales; esta condición ya no es ahora arbitraria, puesto que es la consecuencia de los propios principios de la mecánica ondulatoria, lo que es más satisfactorio desde el punto de vista lógico.

Téngase bien en cuenta que se habla aquí de trayectoria electrónica, aunque de hecho no pueda localizarse la posición del electrón.

El principio de indeterminación de Heisenberg. — En rigor, la onda monocromática, es decir, de longitud λ bien definida, asociada a un corpúsculo, debe reemplazarse por un "tren de ondas". Supongamos que este "tren de ondas" se propaga a lo largo del eje Ox, con una anchura dx, y en la gama λ, $\lambda + d\lambda$. Se demuestra que deberá tenerse

$$d\left(\frac{1}{\lambda}\right)dx \geqq 1, \text{ pero } \frac{1}{\lambda} = \frac{mv}{h}, \text{ de donde } d\left(\frac{1}{\lambda}\right) = \frac{d(mv)}{h}$$

y por consiguiente $$\frac{1}{h}\,d(mv)\,dx \geqq 1,$$

o finalmente $$d(mv)\,dx \geqq h;$$

mv es la cantidad de movimiento del corpúsculo, x su abscisa, $d(mv)$ y dx son las posibilidades de variación de estas cantidades. Se ve que si se llegara a precisar la posición exacta del corpúsculo, es decir, si dx fuera nula, el error relativo a la cantidad de movimiento sería infinito, y recíprocamente. Es decir, que hay que renunciar a poder precisar simultáneamente la posición y la cantidad de movimiento —o la velocidad— de un corpúsculo: esto es lo que se conoce por "principio de indeterminación", que es debido a Heisenberg. Puede expresarse de la forma siguiente: *cualquier medida simultánea de la posición y del impulso de un móvil está afectada de errores cuyo producto no puede ser inferior a* h. Estos errores, que son evidentemente despreciables a la escala humana, ya no lo son a la escala atómica. Recordemos que la constante h vale $6{,}55 \cdot 10^{-27}$ C.G.S.

Teoría de la relatividad

Reseña histórica. — **Relatividad restringida:** Principio de relatividad en la mecánica clásica. Incompatibilidad aparente entre el principio de relatividad y el electromagnetismo. Análisis de la noción de tiempo. La simultaneidad. Análisis de la noción de longitud. Las fórmulas de Lorentz. Consecuencia de las fórmulas de Lorentz. Principio de la relatividad restringida. Masa. Energía. El universo de Minkowski. — **Teoría de la relatividad generalizada:** Insuficiencia de la relatividad restringida. Sistemas de coordenadas. Expresión del invariante «ds^2» en un espacio no euclidiano. Nueva teoría de la gravitación. Movimiento del perihelio de Mercurio. Desviación de los rayos luminosos por los campos gravitatorios. Desplazamiento hacia el rojo de las rayas del espectro. Teorías cosmológicas: expansión del universo

Reseña histórica. — La teoría de la relatividad es, en sus dos formas (1905-1915), obra de **Albert Einstein** (1879-1955). **H. A. Lorentz** (1853-1928) vislumbró ya la relatividad restringida como consecuencia de la experiencia de **Michelson** (1852-1931) sobre el movimiento de la Tierra; la relatividad general consiguió resolver el problema de la naturaleza de la gravitación que había preocupado a **E. Mach** (1838-1916) en 1880. Las teorías cosmológicas fueron concebidas principalmente por Einstein, **De Sitter, Friedmann, Eddington** y el abate **Lemaître.**

Relatividad restringida

Principio de relatividad en la mecánica clásica. — El primer principio de la mecánica es el principio de inercia, que dice así:

Todo cuerpo sobre el cual no se ejerce fuerza alguna permanece en su estado de reposo o de movimiento rectilíneo y uniforme.

Es evidente que este principio sólo puede ser válido con relación a sistemas de ejes de coordenadas particulares. Un ejemplo bastará: las estrellas llamadas fijas no están sometidas a ninguna fuerza, por encontrarse demasiado alejadas de los demás astros y, sin embargo, describen con respecto a la Tierra círculos; el principio de inercia no se verifica para ejes coordenados ligados a la Tierra. Los sistemas de ejes particulares para los cuales es válido el principio de inercia se llaman *sistemas de Galileo*; existe una infinidad de esos sistemas. En efecto, sea S un sistema de Galileo y S′ otro sistema animado con respecto a S de un movimiento de traslación rectilínea y uniforme. Es evidente que si un cuerpo M se mueve con respecto a S con movimiento rectilíneo y uniforme, su movimiento con respecto a S′ será también rectilíneo y uniforme.

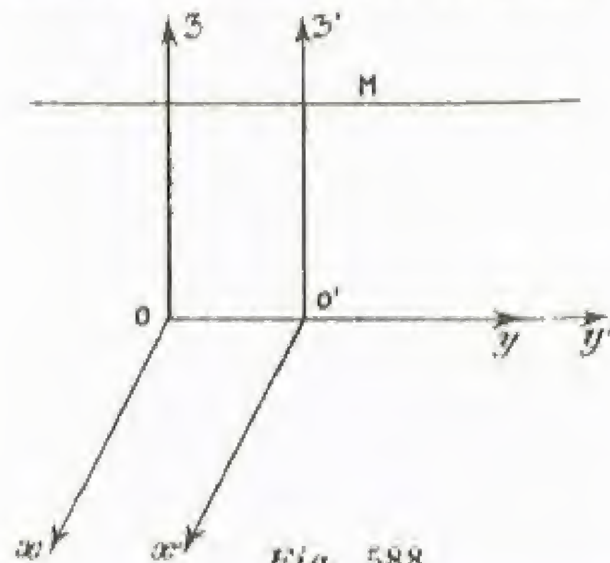


Fig. 588

Sea $Oxyz$ el sistema S, y $O'x'y'z'$ el sistema S′ (*fig.* 588) que se desplaza con respecto a S con la velocidad v. Puede suponerse, para mayor sencillez, que los ejes Oy y $O'y'$ coinciden y que, en el tiempo cero, los puntos O y O′ coinciden también. Las fórmulas del cambio de coordenadas serán

$$(1) \qquad \begin{cases} x = x' \\ z = z' \\ y = y' + vt. \end{cases}$$

Sea entonces M un móvil que se desplaza lineal y uniformemente con respecto a S; supongamos que su trayectoria es paralela a Oy, y sea V su velocidad. Las ecuaciones del movimiento de M serán

$$\begin{cases} x = \text{constante} \\ z = \text{constante} \\ y = y_0 + Vt. \end{cases}$$

Para obtener las ecuaciones del movimiento de M con respecto a S′ basta con substituir x, y, z por sus valores obtenidos de las ecuaciones (1); de donde

$$\begin{aligned} x' &= \text{constante} \\ z' &= \textit{constante} \\ y' + vt &= y_0 + Vt \\ y' &= y_0 + (V - v)t, \end{aligned}$$

que son las ecuaciones de un movimiento rectilíneo y uniforme.

Se deduce de ello que todo sistema animado de un movimiento de traslación rectilíneo y uniforme con respecto a S es un sistema de Galileo. La recíproca también es cierta: todos los sistemas de Galileo están mutuamente animados de movimientos de traslación rectilíneos y uniformes.

Como el principio de inercia es válido para todos los sistemas de Galileo, todas las leyes de la mecánica se expresarán de la misma forma en cualquiera de estos sistemas, o sea:

Las leyes de la mecánica son igualmente válidas para todos los sistemas de Galileo.

Este principio es el *principio de relatividad* de la mecánica clásica.

La fórmula $F = m\gamma$ de la dinámica se escribe, si llamamos x, y, z, a las proyecciones de la fuerza F sobre los tres ejes de coordenadas:

$$X = m\frac{d^2x}{dt^2}, \quad Y = m\frac{d^2y}{dt^2}, \quad Z = m\frac{d^2z}{dt^2}.$$

Las ecuaciones (1) muestran que

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d^2x'}{dt^{2'}}, \quad \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{d^2y'}{dt^2}, \quad \frac{d^2z}{dt^2} = \frac{d^2z'}{dt^2}.$$

Por consiguiente, en el sistema S′, la ecuación $F = m\gamma$ se escribirá

$$X' = m\frac{d^2x'}{dt^2}, \quad Y' = \frac{d^2y'}{dt^2}, \quad Z' = \frac{d^2z'}{dt^2},$$

ecuaciones que son idénticas, desde el punto de vista formal, a las que se han escrito en el sistema S.

Como la física se reduce a la mecánica, puede extenderse el principio de relatividad y decir:

Todas las leyes físicas son válidas para todos los sistemas de Galileo.

Incompatibilidad aparente entre el principio de relatividad y el electromagnetismo. — La teoría electromagnética de Maxwell o, por lo menos, las fórmulas que contiene, han sido verificadas miles de veces; según ellas, cualquier onda electromagnética se propaga en el vacío con una velocidad constante en todas las direcciones, velocidad próxima a 300 000 km por segundo; es la ley de la isotropía de propagación de las ondas electromagnéticas. A pesar de ello, esta ley es incompatible con el principio de relatividad. En efecto, si la velocidad de la luz es c con respecto a un sistema S, su velocidad con respecto a un sistema S′, que se propaga con un movimiento rectilíneo y uniforme de velocidad v' en el sentido de la señal luminosa, será $c - v$, en virtud del teorema de la composición de velocidades.

¿Habrá que abandonar la ley de propagación de las ondas electromagnéticas o el principio de relatividad?

Hemos visto que el número que mide la velocidad de la luz expresada en centímetros por segundo es igual al cociente entre la unidad C.G.S. electrostática de cantidad de electricidad y la unidad C.G.S. electromagnética de cantidad de electricidad. Parece evidente que este cociente debe ser el mismo, ya se hagan las mediciones en un sistema de Galileo o en cualquier otro; por consiguiente, el principio de relatividad debe aplicarse a la ley de propagación de las ondas electromagnéticas, es decir, que la velocidad de propagación de dichas ondas debe ser la misma con respecto a todos los sistemas de Galileo. Pero el teorema de la composición de velocidades nos enseña lo contrario; es este teorema el erróneo, como demostró Einstein, creando así la teoría de la relatividad. Este teorema está basado en dos principios que no habían sido nunca puestos en duda, a saber:

1° Que el tiempo es el mismo en todos los sistemas;

2° Que la longitud de un objeto es la misma, ya esté medida en un sistema o en otro cualquiera.

Vamos a ver ahora que estos dos principios, por muy evidentes que parezcan, a causa de nuestros hábitos mentales, no son exactos.

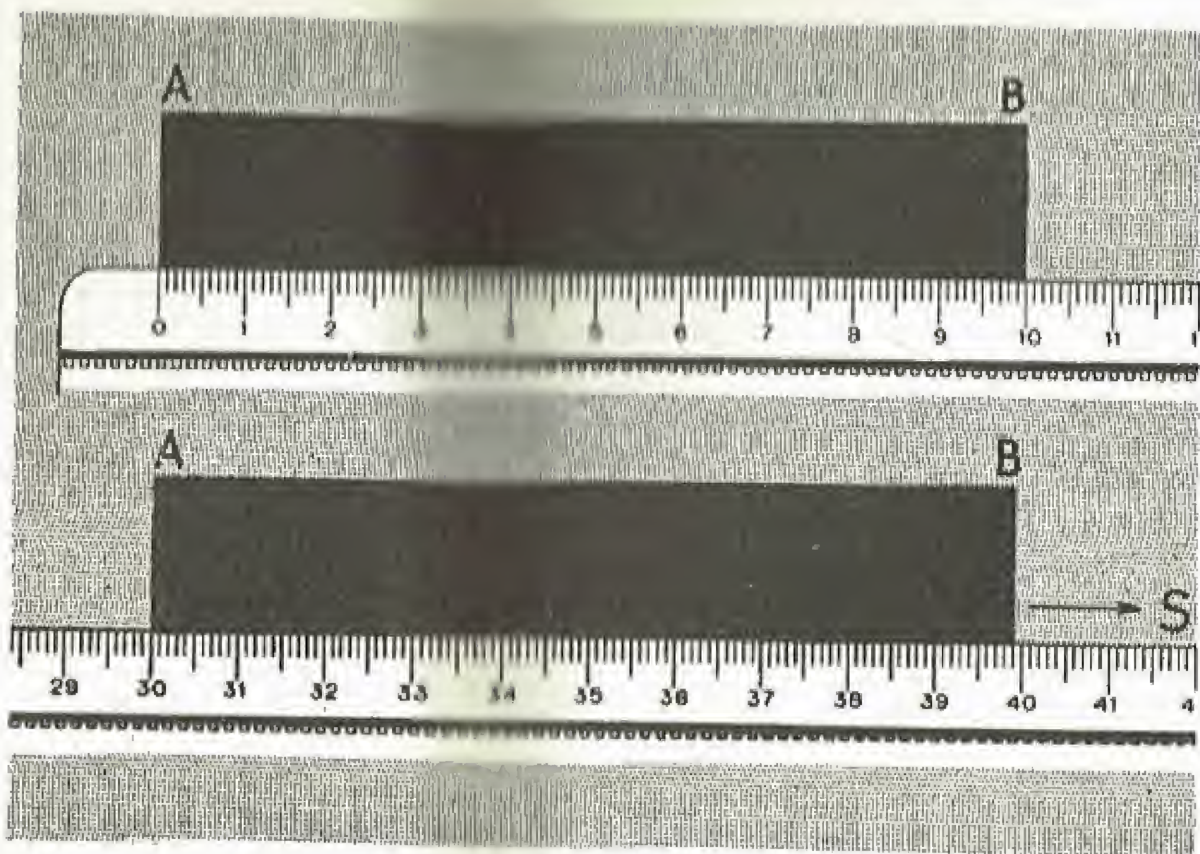
Análisis de la noción de tiempo. La simultaneidad. — Hasta Einstein, parecía evidente que si dos fenómenos son simultáneos para una persona, lo son para todo el mundo, y sin embargo no es cierto. Distingamos primeramente entre simultaneidad en un mismo punto y simultaneidad a distancia.

La primera, o *coincidencia espacio-temporal*, se distingue de la segunda en que es válida para todos los sistemas; en efecto, al decir que dos rayos han caído simultáneamente en un mismo punto A, se expresa el hecho de que los relámpagos producidos por estos dos rayos han sido divisados al mismo tiempo, hecho que será válido para cualquier observador, ya esté inmóvil o móvil con respecto a mí. La simultaneidad en un mismo punto, o coincidencia espacio-temporal, es, pues, una verdad universal.

No ocurre lo mismo con la simultaneidad a distancia. Tratemos primeramente de definirla: *diremos que dos sucesos que se producen en dos puntos* A *y* B *son simultáneos si un observador situado en medio de* AB *los percibe al mismo tiempo.* Observemos primeramente que esta definición concuerda con la idea que nos hacemos habitualmente de la simultaneidad y que, por otra parte, se demuestra fácilmente que si dos acontecimientos son simultáneos a un tercero, son también simultáneos entre sí.

Preguntémonos entonces si dos sucesos simultáneos con respecto a un sistema S lo serán también con respecto a un sistema S′, móvil con respecto a S.

Consideremos nuevamente los sistemas de coordenadas $Oxyz$ y $O'x'y'z'$, el segundo de los cuales se mueve con respecto al primero con la velocidad v (*fig.* 589), y supongamos que se producen simultáneamente dos sucesos, en puntos A y B de S: esto equivale a decir que estos sucesos



La longitud AB es más corta con respecto a la regla graduada cuando ésta se mueve hacia S

son percibidos simultáneamente por un observador situado en S, en el centro M de AB. Sean entonces A' y B' los dos puntos del sistema S' que coinciden con A y B en los momentos en que se producen los fenómenos considerados; estas coincidencias son *espacio-temporales*, de forma que son válidas para todos los sistemas. Sea también M' el punto medio de A'B': según nuestra definición, los sucesos que se han producido en A y B serán simultáneos con respecto a S' si el observador situado en M' percibe simultáneamente ambos sucesos. Ahora bien, durante el tiempo en que se propagan las señales luminosas procedentes de A y de B, el punto M' se desplaza hacia B, y por consiguiente percibirá el suceso que se produzca en B antes del que se produzca en A, puesto que para llegar a M' la luz procedente de A tendrá que recorrer un camino (contado en el sistema S) más largo que la procedente de B. El observador del sistema S' situado en M', en cambio, no será de la misma opinión, y dirá: los dos sucesos se han producido en puntos A' y B' de mi sistema, y yo me encuentro situado exactamente en el punto medio de la distancia A'B'; como yo percibo el suceso que se produce en B' antes del que se produce en A', estos sucesos no son, por consiguiente, simultáneos para mí, de acuerdo con la propia definición de la simultaneidad a distancia.

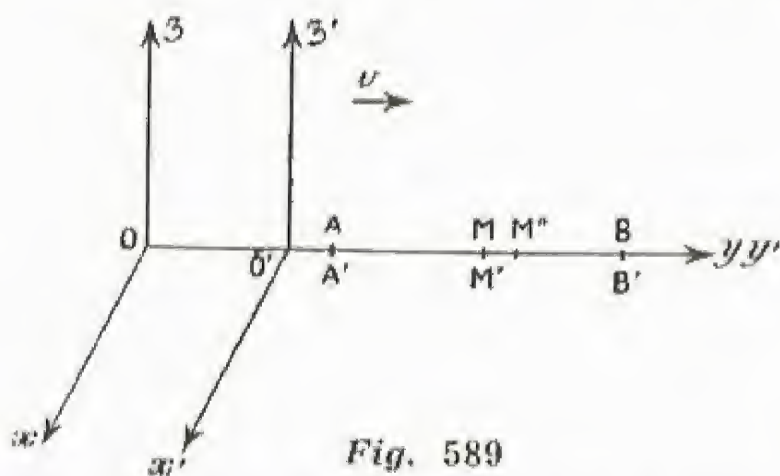


Fig. 589

Por consiguiente, dos sucesos simultáneos con respecto a un sistema no lo son necesariamente para otro sistema móvil con respecto al primero, de donde se deduce inmediatamente que el tiempo que se mide en un sistema es característico del mismo: cada sistema de referencia tiene su *tiempo propio*. El tiempo no es absoluto, sino relativo.

Hemos mostrado así que el primer principio sobre el cual se basa el teorema de la composición de velocidades es inexacto.

Es conveniente señalar que el resultado, de aspecto paradójico, que acabamos de establecer, procede de que no conocemos medio alguno de transmisión instantánea, siendo el más rápido la luz, o, con más generalidad, las ondas electromagnéticas. Para definir el tiempo de una manera satisfactoria desde el punto de vista lógico nos vemos obligados a utilizar sólo lo que conocemos y, por consiguiente, a eliminar los medios de transmisión instantánea; cualquier otra manera de proceder, conviene persuadirse bien de ello, es pura fantasía. El tiempo, tal como acabamos de definirlo, no es por tanto una invención de Albert Einstein, sino que es el tiempo que medimos con nuestros relojes. La obra de Einstein ha consistido en aclarar esta noción de tiempo, descubriendo en ella una propiedad insospechada.

Análisis de la noción de longitud. — Consideremos nuevamente los sistemas S y S' anteriores, y supongamos que los físicos de S' quieren medir una longitud AB sobre Oy (*fig.* 590); para ello, colocarán una regla dividida a lo largo de O'y', y anotarán las divisiones de esa regla que se encuentren simultáneamente —con respecto a sus sistemas— enfrente de los puntos A y B. Como la simultaneidad no es la misma para los dos sistemas, los físicos del sistema S considerarán que las divisiones anotadas sobre la regla dividida no estaban simultáneamente enfrente de los puntos A y B; es decir, que considerarán que la longitud hallada por los físicos de S' para AB no es la misma que esta longitud medida por ellos mismos. Por lo tanto, *las medidas de una misma distancia AB efectuadas en sistemas mutuamente móviles no son, en general, iguales.* Llamaremos *longitud propia* de AB la medida de esta longitud efectuada en un sistema inmóvil con respecto a AB. El segundo principio sobre el cual se basa el teorema de la composición de velocidades, es, pues, inexacto.

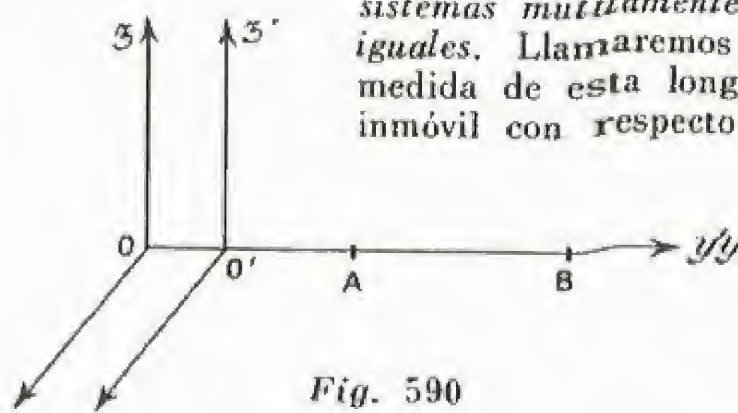


Fig. 590

Las fórmulas de Lorentz. — Es necesario ahora conocer las relaciones que ligan los tiempos t y t' medidos en los dos sistemas S y S' y las que ligan las coordenadas x y z, x' y' z'; es decir, hay que determinar las fórmulas del cambio de coordenadas considerando el tiempo como una cuarta coordenada. Las fórmulas dadas anteriormente no convienen, porque se apoyan sobre dos principios reconocidos como falsos. Veamos lo que debe servir de guía en la búsqueda de estas fórmulas:

1º El principio de inercia debe verificarse para dos sistemas de Galileo;

2º La velocidad de la luz debe ser la misma en dos sistemas de Galileo.

La primera condición implica que las fórmulas sean de primer grado en x y z t, x' y' z' t', y la segunda, que se tenga idénticamente

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2,$$

donde c es la velocidad de la luz. Se observa fácilmente que las fórmulas que convienen, en el caso particular de los sistemas S y S' antes descritos, son:

$$\begin{cases} x' = x \\ y' = \dfrac{y - vt}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}}, \\ z' = z \\ t' = \dfrac{t - \dfrac{v}{c^2}y}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}}, \end{cases}$$

donde v designa la velocidad del sistema S' con respecto a S; estas fórmulas se llaman *fórmulas de Lorentz*.

Observemos inmediatamente que si la velocidad v es pequeña con respecto a la velocidad c de la luz, como sucede corrientemente, pueden despreciarse las relaciones $\dfrac{v^2}{c^2}$ y $\dfrac{v}{c^2}$, y las fórmulas se convierten en

$$\begin{cases} x' = x \\ y' = y - vt \\ z' = z \\ t' = t, \end{cases}$$

que son precisamente las que se han establecido anteriormente, conocidas por *fórmulas de Galileo*.

Observemos también que las *fórmulas de Lorentz* sólo tienen sentido cuando $1 - \dfrac{v^2}{c^2}$ es positivo, o sea si v es menor que c.

La velocidad de la luz es, pues, un límite que no puede alcanzar ningún móvil; de hecho, los corpúsculos β, que son los móviles conocidos de mayor rapidez, tienen una velocidad que se aproxima a la de la luz, pero que no la alcanza.

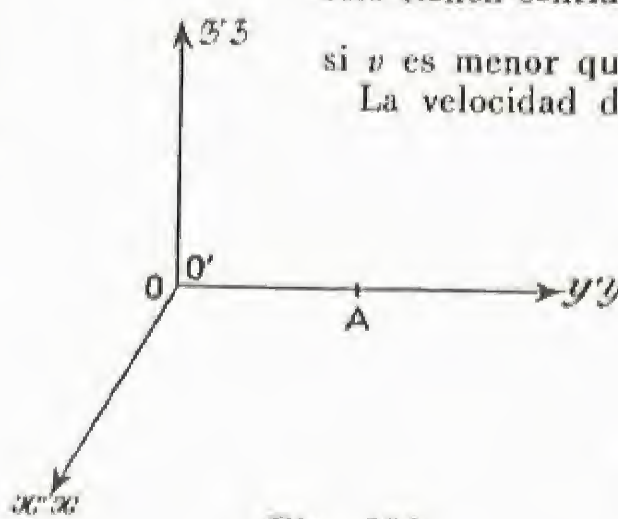
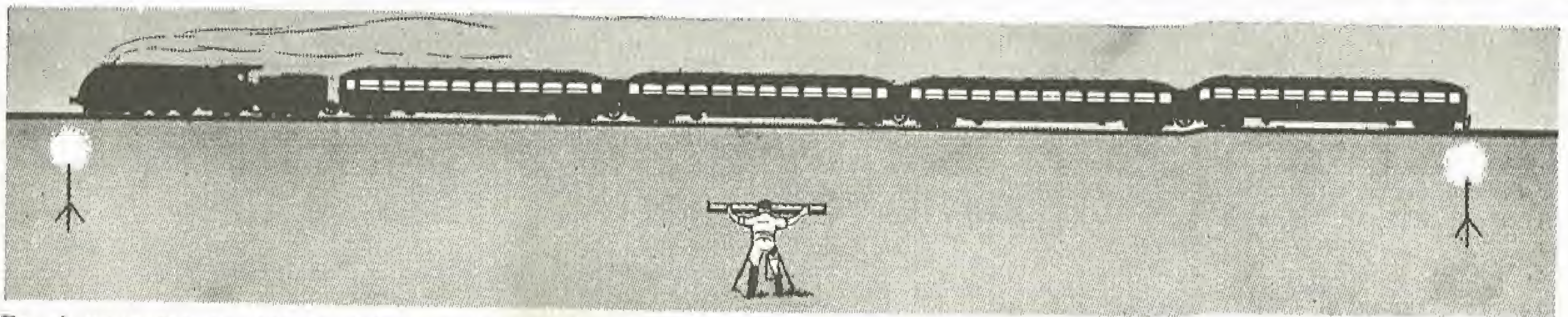


Fig. 591

Consecuencias de las fórmulas de Lorentz. — **1º Modificación de las longitudes.** — Hemos dicho que la distancia que separa a dos puntos no tiene la



En el momento en que la cabeza y la cola de un tren pasan, respectivamente, por dos puntos, estallan dos relámpagos de magnesio. Un observador situado en el punto medio de estos puntos los percibe a través de un periscopio con espejo, que le permite hacerlos coincidir; si los percibe al mismo tiempo, son, por definición, simultáneos; sin embargo, no lo son para un observador situado en el centro del tren

misma medida en los dos sistemas en movimiento uno con respecto a otro; podemos ahora precisar. Supongamos que en el instante cero del sistema S queremos medir las distancias OA y O'A de los orígenes O y O', que se suponen confundidos en este instante (*fig.* 591), en un punto A situado sobre O*y*. Se tendrá

En el sistema S $\quad OA = y$
En el sistema S' $\quad O'A = y'$.

En virtud de las fórmulas de Lorentz:

$$y' = \frac{y - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

pero como, por hipótesis, $t = 0$,

$$y' = \frac{y}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

u

$$O'A = \frac{OA}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

La medida O'A es menor que la OA, mientras que la teoría clásica las considera iguales. Inversamente, si tomáramos un punto A' sobre O'*y*' tendríamos

$$OA' = \frac{O'A'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

La medida de la distancia entre dos puntos del sistema S efectuada en el sistema S' es inferior a la medida propia, y recíprocamente. También puede decirse, más brevemente y con menos exactitud:

Parece como si se contrajeran las longitudes en el sentido de su movimiento.

Obsérvese que longitudes tomadas sobre los ejes O*x*, O'*x*', O*z*, O'*z*', tienen iguales medidas en los dos sistemas. De estas modificaciones de las longitudes se deducen inmediatamente las modificaciones de las superficies y de los volúmenes.

Experiencia de Michelson. — El resultado que acabamos de establecer permite interpretar una experiencia debida a Michelson y Morley, que no pudo ser interpretada en el momento en que se efectuó (1895). El principio de esta experiencia es el siguiente: dos espejos M y M', colocados formando ángulo recto, equidistan de un punto O (*fig.* 592); este último punto es luminoso. Cuando el aparato está inmóvil, se observa en O un sistema de franjas de interferencia debido a los rayos reflejados por M y M'. Si se imprime al aparato un movimiento de traslación en la dirección OM, el cálculo, efectuado con arreglo a la teoría clásica, muestra entonces que, de dos rayos procedentes simultáneamente de O y reflejados por los espejos M y M', respectivamente, el primero vuelve a O después del segundo. Este retraso entre los rayos debería crear un desplazamiento del sistema de franjas de interferencia. Ahora bien, la experiencia hecha para descubrir el movimiento de traslación de la Tierra mostró que este desplazamiento no se verificaba, lo que es debido a que la distancia OM se ha "contraído" a causa de su movimiento y esta "contracción", calculada con arreglo a las fórmulas de Lorentz, es tal, que no debe producirse ningún desplazamiento de las franjas. Quede bien claro que las *medidas* de las longitudes OM y OM' son siempre iguales para un observador ligado al aparato y dejan de serlo para un observador móvil con respecto al aparato.

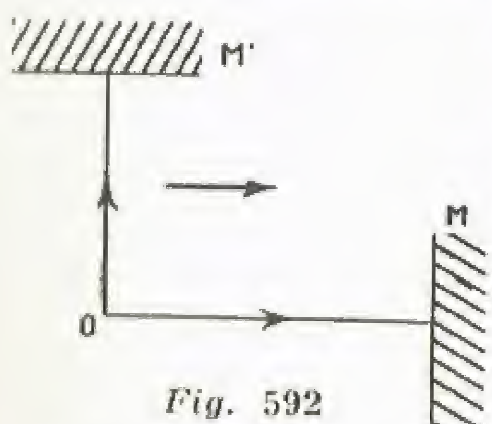


Fig. 592

2° **Retraso recíproco de los relojes en movimiento de traslación mutuo.** — Consideremos un reloj del sistema S situado en el punto O, que se supone que bate segundos; los tiempos $t_1 = 0$ y $t_2 = 1$ corresponden a dos batimientos sucesivos. Calculemos el intervalo que separa estos dos batimientos medido en el sistema S'. Las fórmulas de Lorentz dan

$$t'_1 = \frac{0 - \frac{v}{c^2} \cdot 0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 0,$$

$$t'_2 = \frac{1 - \frac{v}{c^2} \cdot 0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Para un observador del sistema S', el intervalo entre los dos batimientos del reloj de S es mayor que un segundo; es decir, el reloj de S retrasa con respecto a un reloj de S', y recíprocamente.

3° **El nuevo teorema de la composición de velocidades.** — Sea un móvil M que se desplaza con la velocidad v con respecto a S' y con un movimiento rectilíneo y uniforme, paralelamente a O'*y*'. Las ecuaciones de su movimiento son

$$x' = \text{constante},$$
$$y' = wt',$$
$$z' = \text{constante},$$

admitiendo que en el tiempo $t' = 0$ el punto M está en el plano O'*x*'*z*'. Para obtener las ecuaciones del movimiento de M con respecto a S' basta con efectuar el cambio de coordenadas utilizando las ecuaciones de Lorentz; se tendrá:

$$\begin{cases} x = \text{constante}, \\ \dfrac{y - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = w \dfrac{t - \frac{v}{c^2} y}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \\ z = \text{constante}, \end{cases}$$

o

$$\begin{cases} y - vt = wt - \dfrac{wv}{c^2} y, \\ x = \text{constante}, \\ z = \text{constante}, \end{cases}$$

o, finalmente, para la primera ecuación

$$y = \frac{v + w}{1 + \frac{vw}{c^2}} t.$$

La velocidad del punto M con respecto a S no es $v + w$, como indica el teorema clásico de la composición de velocidades, sino

$$\frac{v + w}{1 + \frac{wv}{c^2}}.$$

Una experiencia ya antigua, debida a Fizeau, corrobora este resultado. Un fluido circula por un tubo T con una velocidad v, y una señal luminosa se propaga por dicho fluido con una velocidad w. ¿Cuál será la velocidad c' de esta señal con respecto al tubo T? La teoría de la relatividad dice

$$c' = \frac{v + w}{1 + \frac{vw}{c^2}},$$

o, aproximadamente,

$$(v + w)\left(1 - \frac{vw}{c^2}\right)$$

o

$$c' = v\left(1 - \frac{vw}{c^2}\right) + w - \frac{vw^2}{c^2};$$

como $\frac{vw}{c^2}$ es pequeño con respecto a las otras magnitudes, podrá escribirse

$$c' = v\left(1 - \frac{w^2}{c^2}\right) + w.$$

Este resultado es el que obtuvo Fizeau y los experimentadores que efectuaron nuevamente la experiencia.

Contrariamente a la experiencia de Michelson y Morley, la de Fizeau se explicó por medio de ciertas hipótesis; la teoría de la relatividad la explica sin recurrir a hipótesis alguna.

Obsérvese que, si en la fórmula que da la composición de velocidades, se añade a la velocidad de la luz c una velocidad cualquiera v, vuelve a encontrarse la primera; en efecto, la fórmula da

$$\frac{v + c}{1 + \frac{cv}{c^2}} = \frac{c^2 (v + c)}{c^2 + cv} = \frac{c(v + c)}{c + v} = c,$$

resultado que era de esperar, puesto que, en virtud de la propia forma de las fórmulas de Lorentz, la velocidad c es una velocidad máxima.

Principio de la relatividad restringida. — El principio de relatividad antes enunciado parecía contradecir la ley de propagación de las ondas electromagnéticas en el vacío; superada esta contradicción, el principio recobra todo su valor y puede enunciarse en la forma siguiente:

Si las leyes físicas son válidas con respecto a un sistema de coordenadas S en su forma más sencilla, también lo serán para un sistema S' que se mueve con movimiento de traslación uniforme con respecto a S.

Este principio se llama *principio* o *postulado de la relatividad restringida*, significando este último término que la validez del principio se limita al caso en que S y S' se desplazan mutuamente con movimientos de *traslación uniforme.*

Masa. — Del principio de la relatividad restringida se deduce que si las ecuaciones de la dinámica son válidas en su forma más sencilla, es decir,

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = X, \quad m \frac{d^2y}{dt^2} = Y, \quad m \frac{d^2z}{dt^2} = Z,$$

o también

$$\frac{d}{dt}\left(m\frac{dx}{dt}\right) = \text{X}, \quad \frac{d}{dt}\left(m\frac{dy}{dt}\right) = \text{Y}, \quad \frac{d}{dt}\left(m\frac{dz}{dt}\right) = \text{Z},$$

en un sistema S, asimismo lo son en un sistema S′ que se mueve con respecto a S con movimiento de traslación uniforme. Se dice que las ecuaciones deben ser *invariantes* en la transformación de S y S′, condición que se cumplía en la mecánica clásica suponiendo la masa m invariable y válida la transformación de Galileo; pero sabemos que esta última debe reemplazarse por la de Lorentz. ¿Se conserva entonces la invariabilidad de la masa? El cálculo, que no desarrollaremos, responde negativamente; para conservar las ecuaciones de la dinámica en forma invariante hay que admitir que un cuerpo de masa m en un sistema S, en el que se encuentra en reposo, tiene la masa $\dfrac{m}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$ cuando se mueve en este mismo sistema con la velocidad v; o sea:

La masa de un cuerpo medida en un sistema dado no es invariable, sino que depende del estado de reposo o de movimiento del cuerpo. Si m es la masa en reposo, será $\dfrac{m}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$ *si el cuerpo se mueve con la velocidad* v.

Este resultado ha podido comprobarse experimentalmente en el estudio del movimiento de los rayos β y de los rayos catódicos, encontrándose que la masa de un electrón aumentaba con su velocidad, con arreglo a la fórmula anterior. Las mediciones sólo pudieron efectuarse con electrones, que son los únicos móviles con velocidades suficientemente grandes para que la variación de su masa sea perceptible.

Como la masa es variable, el principio de conservación de la energía ya no es válido; de hecho sigue siendo válido mientras no haya variación de energía, ya que, como vamos a ver, las nociones de masa y de energía se confunden.

Energía. — Según la teoría clásica, si un cuerpo se desplaza a la velocidad v, su energía cinética es $\text{W} = \dfrac{1}{2}m_0v^2$, energía que restituye al detenerse. Este resultado no subsiste en la teoría de la relatividad restringida, ya que se encuentra, para la energía cinética de un cuerpo de masa m_0 en reposo, el valor

$$\text{W} = m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}} - 1\right)$$

o

$$\text{W} = m_0\frac{v^2}{2} + \frac{3}{8}m_0\frac{v^4}{c^2} + \ldots,$$

valor que difiere muy poco del que da la teoría clásica, si la velocidad v es pequeña con respecto a la de la luz.

Por consiguiente, la energía cinética de un cuerpo ya no es $\dfrac{1}{2}mv^2$, sino $m_0c^2\left(\dfrac{1}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}} - 1\right)$: ahora bien, cuando un cuerpo adquiere, partiendo del reposo, la velocidad v, su masa se convierte en $\dfrac{m_0}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$, es decir, que experimenta un aumento de $\Delta m = m_0\left(\dfrac{1}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}} - 1\right)$ y se tendrá $\Delta m = \dfrac{\text{W}}{c^2}$, lo que puede expresarse de la siguiente forma:

Cuando la energía cinética de un cuerpo se incrementa en W, *su masa aumenta* $\dfrac{\text{W}}{c^2}$.

Este resultado se generaliza fácilmente para un incremento cualquiera de energía, puesto que una energía de tipo particular puede transformarse en energía de cualquier otro tipo. Podrá, pues, decirse:

Cuando la energía de un cuerpo aumenta W, *su masa aumenta* $\dfrac{\text{W}}{c^2}$.

La masa de un cuerpo es mayor cuando éste está caliente que cuando está frío. Por ejemplo, un gramo de agua que pasa de 0° C a 100° C recibe una energía de 100 calorías, o 418 julios, o también 418.10^7 ergios; su masa aumenta

$$\Delta m = \frac{418.10^7}{9.10^{20}} \quad (c = 3.10^{10} \text{ cm/s})$$

o $\Delta m = 4{,}6.10^{-12}$ gramos, o 4,6 milésimas de millonésima de miligramo.

Decir que la masa de un cuerpo aumenta cuando aumenta su energía es decir que la energía tiene una masa, e inversamente, que la masa es energía. *La energía y la masa son magnitudes de la misma naturaleza.*

Este resultado, si bien se considera, no es tan paradójico como parece a primera vista. ¿No hemos comprobado una inercia de la energía eléctrica bajo forma de fenómenos de autoinducción?

Como la masa y la energía son una misma cosa, bajo aspectos diferentes, se deduce de ello:

1° Que un cuerpo en reposo, de masa m_0, tiene una energía $\text{W} = m_0c^2$.

Esta energía es considerable: la desaparición de un gramo de materia iría acompañada de una producción de energía dada por la fórmula $\text{W} = 1 \times 9 \times 10^{20}$ ergios $= 9 \times 10^{13}$ joules = 25 millones de kWh o, en calorías, $\text{W} = 2 \times 10^{13}$ calorías. Esto equivale al calor que produce la combustión de 2 500 000 kilogramos de carbón.

2° Que la energía que tiene una masa debe ser pesante. Veremos, en efecto, a su debido momento, que los rayos luminosos, que transportan energía, son desviados por el Sol y, de una manera general, por toda masa pesante.

La energía que se libera en las pilas y bombas atómicas procede de la conversión de materia en energía, conversión que sólo afecta, por lo demás, a una escasa proporción de la materia que interviene, aunque no por ello deja de constituir una prueba experimental, de las más notables, de la teoría de la relatividad. Antes hemos mencionado una experiencia más directa que pone en evidencia, y de una manera cuantitativa, la conversión de la masa en energía: cuando electrones positivos penetran en la materia, se produce una emisión de radiación γ muy penetrante ($\lambda = 2{,}4 \times 10^{-8}$ cm), que corresponde a una energía de 500 000 electrones-voltios por fotón. El rendimiento es, aproximadamente, de 2 fotones por electrón positivo; como la conversión de la masa de un electrón en energía liberaría 500 000 electrones-voltios, se llega a la conclusión que esta radiación es producida por el "aniquilamiento" de las masas de un electrón positivo y de un electrón negativo que chocan.

Inversamente, se ha observado la producción simultánea de dos electrones, uno negativo y otro positivo, por "materialización" de la radiación γ.

Hemos visto que se admite en la actualidad que el átomo del helio está formado por cuatro átomos de hidrógeno: 2 protones, 2 neutrones y 2 electrones planetarios. El átomo-gramo de hidrógeno vale 1,008, por lo que el átomo-gramo del helio debería valer 4,032, y sin embargo sólo vale 4. ¿A qué se debe esta diferencia? Sencillamente, a la energía desprendida durante la formación del átomo de helio. Calculémosla:

$$\text{W} = 0{,}032 \times 9.10^{20} = 0{,}288 \times 10^{20} \text{ ergios},$$

o sea $\text{W} = 7 \times 10^{11}$ calorías. Para volver a transformar el átomo-gramo de helio en átomo-gramo de hidrógeno habría que proporcionar la misma energía. En estas condiciones, se comprende la estabilidad del núcleo de helio o helión, del cual están constituidos, como hemos visto, los rayos alfa del radio.

El universo de Minkowski. — En lugar de escribir ecuaciones en un sistema dado, es mucho más cómodo escribir una ecuación que sea válida en todos los sistemas: es lo que se llama una ecuación intrínseca. Por ejemplo, las ecuaciones clásicas de la mecánica se escriben

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = \text{X}, \quad m\frac{d^2y}{dt^2} = \text{Y}, \quad m\frac{d^2z}{dt^2} = \text{Z}.$$

La ecuación intrínseca correspondiente es

$$\vec{\text{F}} = m\vec{\gamma}$$

que para la teoría clásica es válida en todos los sistemas, ya que los vectores $\vec{\text{F}}$ y $\vec{\gamma}$ son los mismos en todos los sistemas, lo que se explica diciendo que un vector es un *invariante*. No ocurre lo mismo en la teoría de la relatividad, ya que el empleo de vectores en el sentido clásico de la palabra sólo puede conducir a ecuaciones intrínsecas, puesto que la longitud de un vector varía según los sistemas que se utilicen. Es importante, pues, obtener, antes de nada, una cantidad invariante análoga a la longitud. En la teoría clásica, la distancia ds entre dos puntos próximos de coordenadas x, y, z, y $x + dx$, $y + dy$, $z + dz$, se expresa por la fórmula

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2.$$

Se dice que el "ds^2" es el invariante fundamental. ¿Qué le corresponde en la teoría de la relatividad? Como hemos visto, la constancia de la velocidad de la luz en el vacío se expresaba por la ecuación

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2t'^2$$

o, en forma diferencial

$$dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2dt^2 = dx'^2 + dy'^2 + dz'^2 - c^2dt'^2.$$

En virtud de esta igualdad, su primer miembro es un invariante: es el "ds^2" que buscábamos. Escribiremos, pues,

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2\,dt^2$$

o, para mayor comodidad en los cálculos,

$$ds^2 = c^2\,dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2,$$

y llamaremos a ds *intervalo de universo.*

Si consideramos un espacio de cuatro dimensiones cuyas coordenadas sean x, y, z, t, el ds^2 sería

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 + dt^2.$$

Se observa que existe una gran analogía entre el ds^2 de un espacio de cuatro dimensiones y el ds^2 del universo en que vivimos, sin que haya identidad, porque en la expresión del intervalo de universo todas las coordenadas no van precedidas del mismo signo. El tiempo desempeña la función de una coordenada especial, lo que es fácilmente comprensible, porque en la naturaleza el tiempo es notoriamente diferente de las longitudes; pero esta coordenada de tiempo no es tan especial que no le sea aplicable la geometría de cuatro dimensiones, generalización de la de tres. Se podrán definir vectores de cuatro componentes y podremos, con ayuda de dichos vectores y de cantidades también invariantes llamadas *tensores*, que no definiremos, escribir *ecuaciones intrínsecas*.

Esta idea, muy importante, se debe a Minkowski, y ha facilitado sobremanera el establecimiento de la teoría de la relatividad restringida, desempeñando una función aún más importante en la teoría de la relatividad generalizada.

Análogamente a como hemos definido el intervalo del universo, también podemos definir la *longitud de una línea de universo*, que será la suma de los intervalos que separan dos sucesos consecutivos en la línea de universo. Por ejemplo, calculemos la longitud de la trayectoria de un móvil; como es un invariante, se pueden escoger los ejes que se quiera, por ejemplo ejes ligados al móvil. Entonces, $dx = 0$, $dy = 0$, $dz = 0$ y se tendrá

$$ds^2 = c^2\, dt^2,$$

de donde

$$s = ct,$$

siendo t el tiempo propio del móvil.

La recta de universo será, por una generalización de la recta euclidiana, la línea de universo *más larga* que vaya de un suceso a otro.

Teoría de la relatividad generalizada

Insuficiencia de la relatividad restringida. — La relatividad restringida, como también la teoría clásica, adolece de un defecto muy grave: no satisface el principio de causalidad. En efecto, si se indaga por qué causa un sistema de Galileo S y un sistema S′ animado de un movimiento cualquiera con respecto a S no son equivalentes para las leyes físicas, no se encontrará ninguna. El movimiento de S′ con respecto a S no es una causa, puesto que, inversamente, S está en movimiento con respecto a S′. La diferencia que existe entre los sistemas S y S′ parece carecer de causa, y al considerar la cuestión se comprueba que esta apariencia es una realidad. Como toda la ciencia se basa en el principio de que todo efecto tiene una causa, no cabe admitir una teoría que contradiga este principio. La única solución a esta dificultad es que todos los sistemas sean válidos para las leyes físicas.

Expongamos primeramente un argumento en favor de esta solución. Sean, en un espacio vacío de materia, el sistema S de Galileo y el sistema S′ que se mueve con respecto al primero con un movimiento uniformemente acelerado; designemos por M, M′, M″, etc., diversos móviles que, al no estar sometidos a ninguna fuerza, se desplazan con un movimiento rectilíneo y uniforme con respecto al sistema S de Galileo. Sus movimientos con respecto a S′ serán uniformemente acelerados y con la *misma aceleración* (la del sistema S′ con respecto a S).

¿Llegarán los físicos de S′ a la conclusión de que su sistema tiene realmente un movimiento acelerado? Evidentemente, no. Lo mismo podrían decir que en el dominio de universo donde se encuentran M, M′ M″ reina un campo gravitatorio. Esta respuesta no es posible más que gracias al hecho de que el campo gravitatorio imprime a todos los cuerpos la *misma aceleración*. La ley de Newton nos dice, en efecto, que, en el vacío, todos los cuerpos caen con la misma rapidez; insistamos un poco sobre esta cuestión. Se ha visto en electrostática que una carga q situada en un campo $\vec{H}$ está sometida a una fuerza $\vec{F}$ expresada por la fórmula

$$\vec{F} = q\vec{H}.$$

Si m es la *masa de inercia* de esta carga, la aceleración $\vec{\gamma}$ que le comunica la fuerza $\vec{F}$ será:

$$\vec{\gamma} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{q\vec{H}}{m}:$$

el cociente q/m puede tomar todos los valores posibles y, por consiguiente, la aceleración γ es variable, según el cuerpo utilizado.

Supongamos ahora un campo de gravitación $\vec{H}$ y un cuerpo de "carga pesante" q, y se tendrá

$$\vec{F} = q\vec{H} \quad \text{y} \quad \vec{\gamma} = \frac{q}{m}\vec{H}.$$

Pero la masa pesante o gravitatoria es igual a la masa de inercia, el cociente $q/m = 1$ es constante, y por lo tanto $\vec{\gamma} = \vec{H}$.

Eötvös demostró este resultado, con todo el rigor posible, de la siguiente manera: en la superficie de la tierra todo cuerpo está sometido, como es sabido, a dos fuerzas: una es la atracción de la Tierra, y otra es la fuerza centrífuga debida a la rotación de la Tierra. La primera se expresa por $\vec{F} = q\vec{H}$, y la segunda por $\vec{f} = m\vec{\gamma}$. El campo gravitatorio $\vec{H}$ es constante en un punto fijo, como también γ; por consiguiente, si el cociente q/m no fuera el mismo para todos los cuerpos, el cociente $\frac{\vec{F}}{\vec{f}}$ no sería constante, y la suma geométrica de estas dos fuerzas tendría una dirección variable; ahora bien, esta dirección es la que indica una plomada, o sea la vertical del lugar. Eötvös mostró precisamente que en un lugar dado sólo existe una vertical. El cociente q/m es constante e igual a 1 y, por consiguiente, el campo gravitatorio comunica a todos los cuerpos la misma aceleración.

Volvamos a los físicos del sistema S′; como su respuesta es válida, no hay ninguna razón para que consideren como privilegiado el sistema de Galileo S. Cabe, entonces, pensar que las leyes físicas deben expresarse análogamente en ambos sistemas, pero vamos a ver cómo nos veremos obligados a utilizar sistemas de coordenadas diferentes de los que se emplean habitualmente.

Sistemas de coordenadas. — Sea el sistema de Galileo S ($Oxyz$), y el sistema S′ ($O'x'y'z'$), que tiene con respecto al S un movimiento de rotación uniforme alrededor de $O'z'$, que supondremos, además, confundido con Oz (*fig.* 593). Vamos a ver que el sistema S′ carece de *tiempo propio* y que las leyes de la geometría clásica euclidea no le son aplicables. Consideremos, en efecto, un reloj situado en OO′ y otro situado en A, por ejemplo, sobre $O'x'$. El reloj O es inmóvil con respecto a S; el tiempo que marca este reloj es el tiempo propio de S; el reloj A es, en cambio, móvil con respecto a S y, por consiguiente, se retrasa con respecto al reloj de O. Es, pues, imposible definir el tiempo medido en el sistema S′, porque éste varía con el punto considerado.

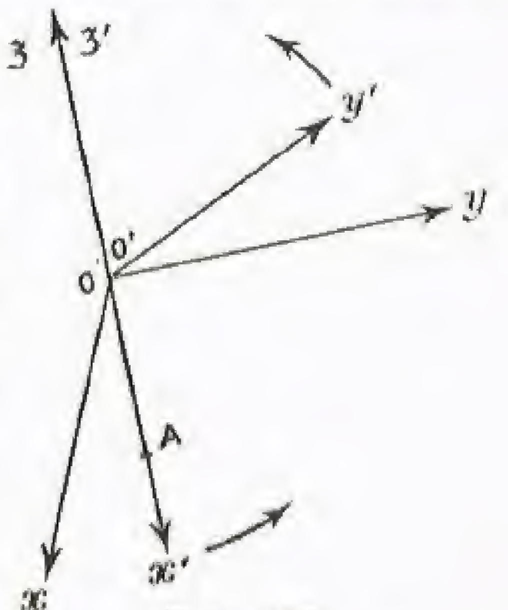


Fig. 593

Consideremos ahora un círculo de centro OO′ trazado en el plano de las xy. Los físicos de S encontrarán que la relación entre la circunferencia y el diámetro es π, pero los físicos de S no encontrarán esta cifra π, ya que para medir el diámetro y la circunferencia aplican de un extremo a otro su unidad de medida; pero en este último caso, su unidad se ha "contraído" a causa del movimiento, lo que no sucede en el primer caso. El resultado de su medida no será π, sino un número mayor. Las leyes de la geometría euclidiana no son válidas para el sistema S′; no es posible saber si existen rectas, ni si por un punto se puede trazar una o varias perpendiculares a una recta. Desde ese momento no es posible definir las coordenadas de un punto S′ de la manera habitual.

Para comprender este resultado algo extraño, recurramos a un viejo ejemplo: imaginemos seres aplastados que se deslizan sobre una esfera, y supongamos que estos seres conocen la geometría. Si sólo operan sobre una pequeña superficie de la esfera, definirán la recta como el camino más corto entre dos puntos, y sabrán trazar dicho camino, que será un círculo máximo de la esfera, sin darse cuenta inmediatamente de que su recta es, en realidad, un círculo. Después postularán que por un punto situado fuera de una recta sólo puede trazarse una paralela a ella, y sólo una, y si no prolongan demasiado sus "rectas" estarán convencidos de esta verdad. Pero si a uno de ellos se le ocurriera prolongar suficientemente dos "rectas" paralelas, se daría cuenta del que estas rectas acabarán encontrándose en dos puntos P y P′ (*fig.* 594); entonces diría que "la geometría euclidiana no se aplica al mundo en que vivimos; el camino más corto entre dos puntos no es una recta, sino un círculo, y además nos es completamente imposible trazar una recta". Este percance es el que les ocurre a los físicos de S′, y el carácter no euclidiano de su mundo les es revelado por la diferencia entre el número π y la relación entre la circunferencia y el diámetro.

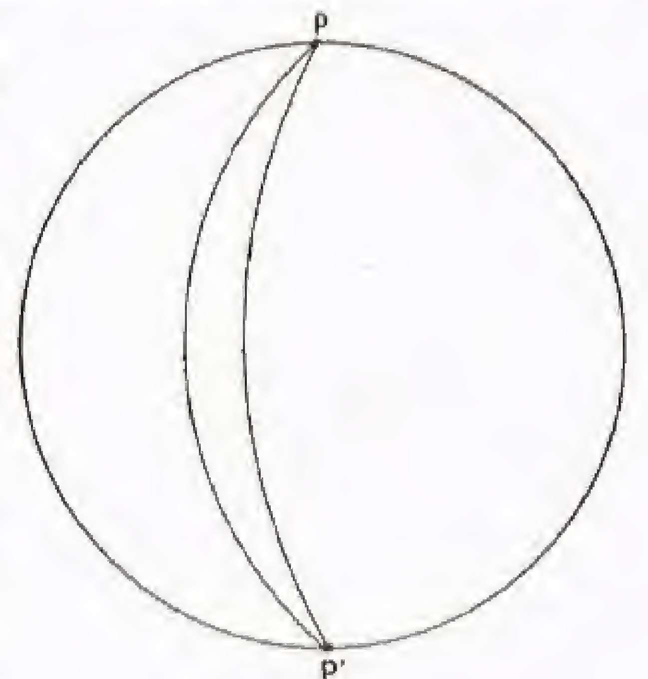
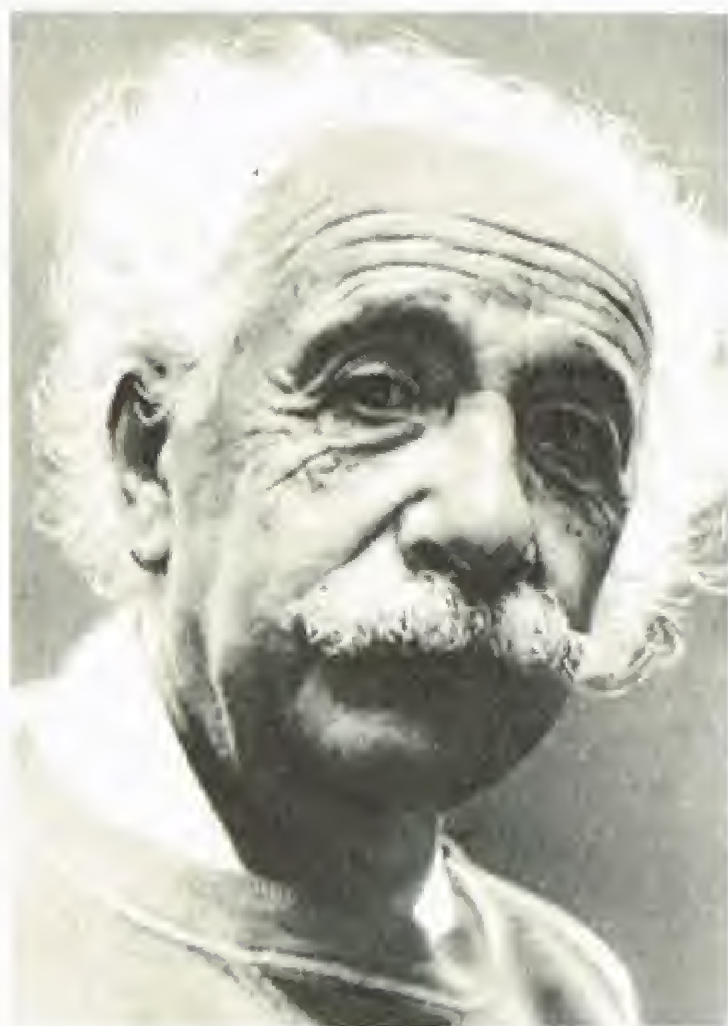


Fig. 594

Pero nuestros seres hipotéticos podrán, no obstante, resolver su problema: en vez de utilizar un sistema de referencia formado por dos rectas rectangulares, trazarán sobre la esfera paralelos y meridianos, y los numerarán. La posición de un punto quedará entonces definida por los números del paralelo y del meridiano que pasan por él; esto es lo que nosotros hacemos cuando decimos que un lugar está situado a 23° de longitud y 33° de latitud. Los físicos del sistema S′ podrán operar de la misma manera utilizando superficies numeradas y que satisfagan la condición de que por un punto sólo pasa una sola superficie de una familia; habrá, evidentemente, tres familias de superficies. Esto podría generalizarse para un mundo de cuatro dimensiones y para el universo de Minkowski: tales sistemas de coordenadas se denominan *sistemas de Gauss*.

El principio de la relatividad generalizada puede entonces enunciarse: *las leyes físicas son válidas para todos los sistemas de coordenadas de Gauss.*

Este postulado puede parecer extraño, pero tenemos ya algunas razones para creerlo exacto: expongamos otra razón. Todas nuestras experiencias consisten en comprobaciones de coincidencias espacio-temporales; en efecto, decir que la distancia AB vale 80 centímetros es expresar el hecho de que en el tiempo t los puntos señalados 0 y 80 coinciden con los puntos A y B, y decir que un suceso ocurre en el instante t es decir que el suceso coincide en el espacio con un reloj cuyas agujas coinciden con los puntos del cuadrante que definen el tiempo t. Como para expresar que dos puntos coinciden basta con escribir que sus coordenadas son iguales, es evidente que estas igualdades serán válidas en todos los sistemas de referencia y, por consiguiente, es lógico que todos los sistemas sean equivalentes para las leyes de la naturaleza.



Einstein (1879-1955), creador de la teoría de la relatividad (*Fot. Keystone*)

Expresión del invariante «ds²» en un espacio no euclidiano. — ¿Cuál será la expresión del invariante fundamental ds en un universo no euclidiano? Para saberlo, consideremos nuevamente el ejemplo de los seres muy aplastados que se deslizan sobre su esfera. Podemos escribir la ecuación de su esfera, la de los paralelos y la de los meridianos, que son, respectivamente (*fig.* 595),

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2$$
$$y = ux$$
$$z = h.$$

Para dichos seres aplastados, un punto de la esfera queda determinado por sus coordenadas de Gauss u y h, y la distancia entre dos puntos próximos de coordenadas u y h, $u + du$ y $h + dh$, será una expresión en du y dh. Se demuestra que esta expresión es

$$ds^2 = g_{11}\, du^2 + g_{12}\, du\, dh + g_{22}\, dh^2,$$

donde g_{11}, g_{12} y g_{22} son funciones de u y de h. En efecto, llevándolos a la ecuación de la esfera, obtendremos:

$$y = ux \quad \text{y} \quad z = h,$$
$$x^2 + u^2x^2 + h^2 = R^2,$$
$$\text{de donde } x^2 = \frac{R^2 - h^2}{1 + u^2},$$
$$\text{y } x = \pm\sqrt{\frac{R^2 - h^2}{1 + u^2}},$$
$$\text{y por lo tanto, } y = \pm\, u\,\frac{\sqrt{R^2 - h^2}}{\sqrt{1 + u^2}},$$
$$\text{y} \quad z = h.$$

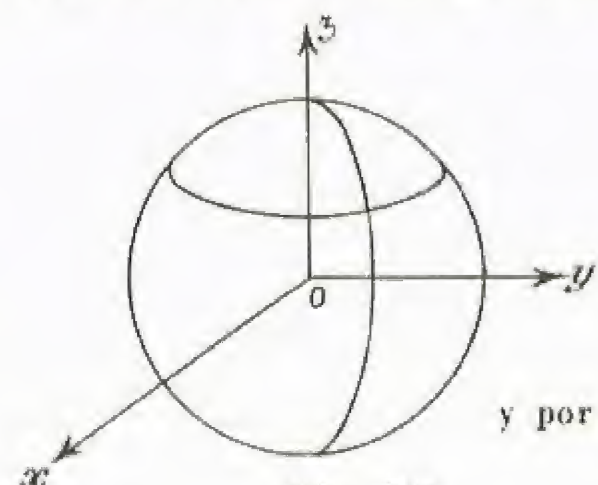


Fig. 595

Esto puede escribirse

$$x = \varphi\,(u, h),$$
$$y = \psi\,(u, h),$$
$$z = \theta\,(h),$$

de donde
$$dx = \varphi'_u \cdot du + \varphi'_h \cdot dh,$$
$$dy = \psi'_u \cdot du + \psi'_h\, dh,$$
$$dz = \theta'\, dh,$$

y
$$ds^2 = [(\varphi'_u)^2 + (\psi'_u)^2]\, du^2 + 2\,[\varphi'_u\varphi'_h + \psi'_u\psi'_h]\, du\, dh + $$
$$+ [(\varphi'_h)^2 + (\psi'_h)^2 + (\theta')^2]\, dh^2,$$

que tiene la forma prevista.

En el caso de un espacio de tres dimensiones no euclidiano se tendría

$$ds^2 = g_{11}\, dx^2 + g_{12}\, dx\, dy + g_{13}\, dx\, dz + g_{22}\, dy^2 +$$
$$+ g_{23}\, dy\, dz + g_{33}\, dz^2,$$

o también, haciendo $x = x_1$, $y = x_2$, $z = x_3$, para tener una notación más simétrica

$$ds^2 = g_{11}\, dx_1^2 + g_{12}\, dx_1\, dx_2 + \ldots,$$

lo que se escribe, en forma simbólica:

$$ds_2 = \Sigma g_{\mu\nu}\, dx_\mu\, dx_\nu,$$

queriendo decir el signo Σ que se suman todas las expresiones $g_{\mu\nu}\, dx_\mu\, dx_\nu$, donde μ y ν representan sucesivamente los números 1, 2 y 3; recuérdese, no obstante, que $g_{12} = g_{21}$, $g_{13} = g_{31}$, etc.

Pero por las mismas razones que nos han conducido, en la relatividad restringida, a utilizar en lugar del espacio clásico el universo o espacio-tiempo de Minkowski, deberemos emplear ahora un espacio-tiempo no euclidiano. En el espacio-tiempo euclidiano se tiene

$$ds^2 = -\, dx^2 - dy^2 - dz^2 + c^2t^2;$$

en el espacio-tiempo no euclídeo tendremos

$$ds^2 = g_{11}\, dx^2 + g_{12}\, dx\, dy + g_{13}\, dx\, dy + g_{14}\, dx\, dt + \ldots$$

o bien, designando las coordenadas de espacio y de tiempo por x_1, x_2, x_3 y x_4:

$$ds^2 = g_{11}\, dx_1^2 + g_{12}\, dx_1\, dx_2 + g_{13}\, dx_1\, dx_3 + g_{14}\, dx_1\, dx_4, + \ldots$$

o también, en forma simbólica,

$$ds^2 = \Sigma g_{\mu\nu}\, dx_\mu \cdot dx_\nu,$$

en donde μ y ν toman, sucesivamente, los valores 1, 2, 3 y 4.

Téngase bien en cuenta que ds^2 es un invariante, es decir, que conserva el mismo valor en todos los sistemas de coordenadas, cualquiera que sea su naturaleza, e insistamos sobre el hecho de que los coeficientes $g_{\mu\nu}$ no son constantes, sino funciones de las cuatro variables x_1, x_2, x_3 y x_4, de forma que la expresión del invariante ds^2 se modifica cuando se pasa de una región del universo a otra.

Busquemos el significado físico de los coeficientes g, para lo cual consideremos, en un espacio vacío de materia, un sistema de Galileo S y otro sistema S′ que se mueve con respecto al primero con movimiento uniformemente acelerado. Como ya se ha explicado, los físicos de S′ creerán que existe un campo gravitatorio, campo que no existe para los de S. En este último sistema, el invariante ds^2 será

$$ds^2 = c^2dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2,$$

mientras que en S′

$$ds'^2 = g_{11}\, dx^2 + g_{12}\, dx\, dy + g_{13}\, dx\, dz + \ldots$$

Ahora bien, lo que distingue a S de S′ es la existencia en el segundo de un campo gravitatorio, o sea que los coeficientes g están ligados a la existencia de este campo, y si se conocen los coeficientes g deduciremos de ellos las leyes del campo gravitatorio; por consiguiente, lo que hace que el espacio-tiempo no sea euclidiano es el campo gravitatorio. En particular, para un sistema de coordenadas de Gauss ligado a la Tierra, el espacio-tiempo no es euclidiano, pero sólo difiere insensiblemente de un espacio-tiempo euclidiano. El espacio-tiempo vuelve a ser euclidiano, en un pequeño dominio, para un sistema ligado a un cuerpo en caída libre, porque entonces el campo gravitatorio desaparece.

Lo anterior hace prever que la teoría de la relatividad generalizada debe proporcionar una teoría de la gravitación diferente de la de Newton, ya que esta última no satisface el postulado de la relatividad generalizada.

Nueva teoría de la gravitación. — Sea un punto móvil M obligado a desplazarse sobre una esfera, y supongamos que no actúa sobre dicho punto ninguna fuerza. ¿Cuál será su trayectoria? En virtud del principio de inercia, será una recta, pero sobre la esfera no existen rectas: la condición que se impone al punto M de desplazarse sobre la esfera puede substituirse por la siguiente: el punto M es libre, pero sometido a una fuerza ficticia tal que su trayectoria esté necesariamente trazada sobre la esfera. Esta fuerza ficticia es fácil de calcular, pudiendo deducirse de ella la trayectoria del punto M, que es un círculo máximo, o sea la línea de longitud mínima que puede trazarse sobre una esfera, que se llama geodésica de la esfera.

Volvamos al problema de la gravitación y busquemos la trayectoria de un punto pesante M en un campo gravitatorio. La fuerza de gravedad es una fuerza ficticia, puesto que se puede hacer que desaparezca, por lo menos en un dominio muy pequeño, mediante una adecuada elección del sistema de coordenadas: la trayectoria del punto M será una geodésica del espacio-tiempo.

Será posible obtener las ecuaciones de esta *geodésica*, puesto que conocemos el ds^2; de él podemos deducir, en efecto, la "longitud" de una *línea de universo* sumando todos los ds^2 relativos a dos puntos consecutivos e infinitamente próximos de esta línea. Podrá hallarse, por lo tanto, la línea de universo cuya "longitud" sea tal que esta línea sea una *geodésica de universo*. Conviene notar que la palabra "longitud" no está tomada aquí en su sentido habitual, puesto que el tiempo entra en la expresión de esta cantidad.

Del movimiento de una partícula en un campo de gravitación se deduce el campo creado por una partícula y, por consiguiente, la ley general de la gravitación. No insistiremos en la expresión de esta ley, demasiado compleja para indicarla en este lugar; difiere muy poco de la de Newton y esta diferencia sólo es sensible para campos de gravitación intensos. Vamos ahora a estudiar las consecuencias verificadas y verificables de está teoría.

Movimiento del perihelio de Mercurio. — Al no ser la ley de gravitación la de Newton, la trayectoria de los planetas no debe ser la que les asigna la teoría clásica; el cálculo muestra que las diferencias entre las trayectorias calculadas según las dos teorías son inaccesibles a nuestras medidas, salvo para la del planeta Mercurio que, por encontrarse muy cerca del Sol, se mueve en un campo de gravitación relativamente intenso. Según la teoría de la relatividad generalizada, el eje mayor de la elipse que describe el planeta Mercurio gira alrededor del Sol en el sentido del recorrido de esta trayectoria, lo que también puede expresarse diciendo que el *perihelio* P, es decir, el punto de la trayectoria más cercano al Sol, gira alrededor del Sol (*fig.* 596).

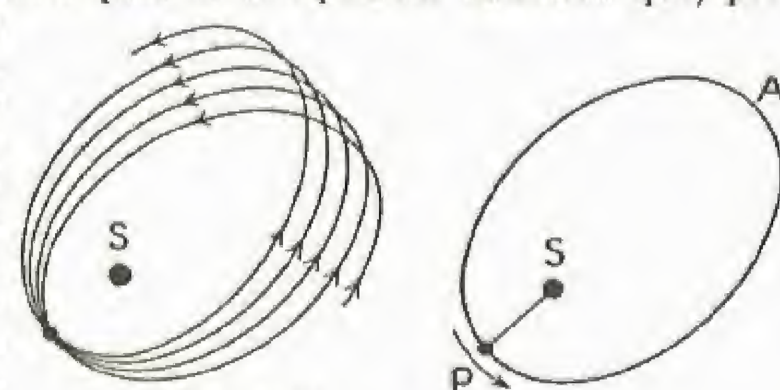


Fig. 596

Este desplazamiento era conocido desde hace mucho tiempo sin que hubiera podido explicarse hasta entonces, y su valor era 43″ de arco por siglo. La relatividad generalizada dio como valor de esta rotación 42″,91. En 1944, el astrónomo Clemence, utilizando 5 000 nuevas observaciones muy precisas del planeta Mercurio, obtuvo la cifra experimental de 42″,84 ± 0″,7: la concordancia era excelente.

Téngase en cuenta que la teoría de la gravitación de Einstein no se elaboró para explicar el movimiento del perihelio de Mercurio: la explicación surgió sin que se hiciera ninguna modificación a la teoría.

Desviación de los rayos luminosos por los campos gravitatorios. — Como el espacio-tiempo no es euclidiano a causa de la gravitación o, más exactamente, a causa de la existencia de masas pesantes, no existen rectas en este espacio-tiempo. ¿Cuál será la trayectoria de un rayo luminoso? Es fácil de obtener. Con respecto a un sistema de Galileo y fuera de todo campo gravitatorio, la luz se propaga en línea recta, es decir, según una geodésica del espacio-tiempo, que es en este caso euclidiano. Como las leyes de la física tienen la misma forma en todos los sistemas de coordenadas, la trayectoria de un rayo luminoso será siempre una geodésica del espacio-tiempo. Para los campos de poca intensidad, como el de la Tierra, la trayectoria de un rayo luminoso se aparta poco de una recta para que esta diferencia sea accesible a nuestras medidas; pero en la proximidad del Sol, el campo gravitatorio es bastante intenso para que pueda medirse en él la desviación de un rayo luminoso.

Consideremos una estrella E que aparezca en la proximidad del Sol S (*fig.* 597); cuando el Sol está en otra región del cielo, la luz que nos llega procedente de E se propaga en la dirección ET, que es sensiblemente una recta, pero cuando la luz de la estrella roza el borde del Sol es desviada y la que recibimos tiene por trayectoria EAT. La prolongación de TA ya no la vemos en E, sino en E′. La desviación α, calculada con arreglo a la teoría de la relatividad generalizada, es igual a 1″,7 para un rayo que pase rozando el borde del Sol.

E X E′ A S α T

Fig. 597

Desde 1919 han podido hacerse numerosas verificaciones experimentales con motivo de los eclipses de Sol. En el momento de un eclipse de Sol se fotografían las estrellas que aparecen en la proximidad de este astro, lo que da las posiciones E′, que pueden llamarse *aparentes*, de las estrellas; algunos meses más tarde vuelve a hacerse una fotografía de la misma región del cielo, cuando el Sol ya no se encuentra en ella; esta vez se registran las posiciones verdaderas E, y de la comparación de las fotografías se deduce el ángulo α. Como este ángulo es muy pequeño, la experiencia presenta grandes dificultades, a pesar de lo cual los resultados han confirmado brillantemente la teoría.

Al empezar a exponer la relatividad restringida se ha admitido que la luz se propagaba en el vacío, en línea recta, con una velocidad constante; la teoría de la relatividad generalizada y la experiencia contradicen esta afirmación. ¿Habrá que deducir que la teoría de la relatividad restringida no tiene ningún valor? Evidentemente, no: significa simplemente que no es rigurosamente válida más que en un dominio vacío de toda materia; por lo demás, ofrece la suficiente aproximación en las regiones en que el campo gravitatorio es poco intenso. Las tres teorías —clásica, de la relatividad restringida y de la relatividad generalizada— tienen, si se quiere, dominios de validez comparables a los de las tres afirmaciones siguientes: la Tierra es plana, la Tierra es redonda, la Tierra es un elipsoide achatado.

Desplazamiento hacia el rojo de las rayas del espectro. — ¿Depende la marcha de un reloj del campo gravitatorio? ¡Naturalmente! hemos visto, en efecto (pág. 177), que en un sistema S′ animado por un movimiento de rotación con respecto a un sistema de Galileo, la marcha de un reloj dependía de su posición y, en efecto, en S′ reina un campo gravitatorio, aunque de un género particular, debido a la llamada fuerza centrífuga. En virtud del propio principio de la relatividad, este resultado se extiende a un campo gravitatorio cualquiera.

Tratemos de ver cómo depende la marcha de un reloj del campo gravitario que reina en S′: para ello, consideremos un reloj en O′ (origen de coordenadas) y otro en A, sobre O*x*. Sean T_0 y T los periodos de estos relojes en el sistema S; *r* la distancia OA en el mismo sistema y ω la velocidad angular de *s*′ con respecto a *s*. La velocidad del reloj A con respecto a O es

$$v = \omega r.$$

Ahora bien, se tiene $$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{(fórmula de Lorentz)}$$

o $$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{\omega^2 r^2}{c^2}}},$$

o sea, sensiblemente, $$T = T_0\left(1 + \frac{1}{2}\,\frac{\omega^2 r^2}{c^2}\right)$$

La expresión de la fuerza centrífuga es $m\omega^2 r$; el campo gravitatorio en S′ será por consiguiente $\omega^2 r$, y deriva de un potencial $V = -\frac{\omega^2 r^2}{2}$.

Por consiguiente podrá escribirse

$$T = T_0\left(1 - \frac{V}{c^2}\right).$$

Esta fórmula, en la que no interviene más que el potencial V del campo, es válida para todos los campos de gravitación, de donde se deduce que el período de un reloj situado en un campo gravitatorio es mayor (puesto que V es negativo) que el de un reloj no sometido a la acción de este campo. Inversamente, la frecuencia $\nu = \frac{1}{T}$ es menor que la frecuencia $\nu_0 = \frac{1}{T_0}$. Como se tiene

$$T - T_0 = \frac{-TV}{c^2},$$

se ve que $T - T_0$ no se hace sensible más que para diferencias de potencial V considerables, puesto que en el denominador figura c^2, que es una magnitud muy grande. De forma que sobre la Tierra no puede verificarse la fórmula anterior, ya que las diferencias de potencial gravitatorio que pueden obtenerse de ella son demasiado pequeñas. La diferencia $T - T_0$ podría llegar a medirse entre un reloj situado en la Tierra y otro en el Sol. La experiencia parece imposible y sin embargo existen relojes naturales que se encuentran tanto en la Tierra como en el Sol: son los átomos. Expliquémonos: cuando un átomo vibra en ciertas condiciones, emite una o varias radiaciones de longitudes de onda características del átomo. En igualdad de las restantes condiciones, una de estas radiaciones tiene un período T constante: tenemos, pues, un reloj, y de los más perfectos. Sean entonces T y T_0 los períodos de las vibraciones de un mismo átomo en el Sol y en la Tierra, y se tendrá

$$T = T_0\left(1 - \frac{V}{c^2}\right),$$

donde V es la diferencia de potencial gravitatorio entre la superficie del Sol y la de la Tierra; como el campo gravitatorio terrestre es despreciable con relación al del Sol, se tendrá

$$V = -\frac{KM}{R},$$

donde M es la masa del Sol, R su radio y K la constante de gravitación. Se tendrá entonces

$$T = T_0\left(1 + \frac{KM}{c^2 R}\right)$$

lo que demuestra que el período de un átomo es menor en la superficie del Sol que en la de la Tierra y, por lo tanto, la longitud de onda emitida será mayor, puesto que

$$\lambda = cT,$$

de donde $$\lambda = \lambda_0\left(1 + \frac{KM}{c^2 R}\right).$$

Podremos, pues, enunciar:

Todas las rayas del espectro solar deben estar desplazados hacia el rojo con respecto a las que se observan en la Tierra. Este desplazamiento es del orden de dos millonésimas de longitud de onda y se ha podido verificar para las rayas del cianógeno y del magnesio (Bouisson y Fabry) y para las rayas del hierro (Pérot). Los números encontrados concuerdan con la fórmula anterior.

En los espectros de estrellas muy densas, que pertenecen a la categoría de las "enanas blancas", y cuya densidad llega a ser cien veces mayor que la del Sol, se han observado desplazamientos de rayas mucho más importantes. El fenómeno está, por tanto, actualmente, fuera de toda duda y la medida del desplazamiento de las rayas cuando dicho desplazamiento es suficientemente grande puede dar el radio y la masa de una estrella.

Teorías cosmológicas: expansión del universo. — La teoría de la relatividad nos enseña que el espacio deja de ser euclidiano en la proximidad de una masa de materia, es decir, que existe una curvatura local del espacio. Nos hemos preguntado si nuestro universo era un espacio euclidiano y por lo tanto infinito, en el que la materia introducía en ciertos lugares curvaturas locales, o si, al contrario, la presencia de materia distribuida por todo el universo no le imponía un carácter general no euclidiano. Utilicemos una imagen en un sistema de dos dimensiones: un universo euclidiano de dos dimensiones sería el constituido por un plano infinito: podría imaginarse tal universo con ligeras curvaturas en ciertos lugares, pero cuya conformación general sería la de un plano, en cierta manera un plano con pequeñas ondulaciones. Puede finalmente imaginarse un universo curvo, como por ejemplo un cilindro (universo infinito) o una esfera (universo finito), o cualquier otra superficie. Este es el problema que se plantea, transpuesto a las tres dimensiones de nuestro universo. El propio Einstein se consagró a su estudio y dio sucesivamente varias soluciones, habiendo dado otras De Sitter, Friedmann y Lemaître. La multiplicidad de estas soluciones, cuyo aspecto matemático es demasiado complicado para exponerlo en este lugar, es debida a la naturaleza de las hipótesis de partida, que sólo pueden justificarse por su concordancia con la experiencia. Uno de los resultados teóricos más interesantes que se han obtenido es que, a muy grandes distancias, la atracción de la gravitación se cambia en una repulsión proporcional a la distancia: es decir, que deberíamos observar una fuga de los objetos más lejanos de nuestro universo, siendo esta velocidad de fuga tanto mayor cuanto más alejado esté el objeto.

Algunos años después de haberse formulado esta paradójica proposición, la astronomía aportó una prueba experimental de la misma, que consiste en lo siguiente: nuestro universo, como se sabe, contiene conglomerados de estrellas separados por enormes distancias. Estos conglomerados son las denominadas galaxias: la Vía Láctea, que observamos en el cielo, es la galaxia a la cual pertenece nuestro Sol, vista en su espesor. Gracias a la existencia de telescopios cada vez más potentes se ha podido observar un gran número de estas galaxias y evaluar las distancias enormes que las separan del centro de la nuestra (varios millones de años-luz). El estudio espectroscópico de la luz emitida por estas galaxias ha revelado una desviación hacia el rojo de todas las rayas del espectro, análoga a la que se observaría si estas galaxias se alejaran de nosotros (efecto Doppler-Fizeau). Las medidas de gran precisión del fenómeno han mostrado que el fenómeno ocurre como si las galaxias se alejaran de nosotros con una velocidad proporcional a su distancia, siendo la constante de proporcionalidad de 170 kilómetros por segundo por millón de años-luz de distancia.

PRINCIPALES NEBULOSAS

CONSTELACIÓN	DIÁMETRO APARENTE (*)	DISTANCIA EN MEGAPARSECS	VELOCIDAD RADIAL (KM/S)	MAGNITUD MEDIA DE LAS NEBULOSAS	POBLACIÓN TOTAL EN NEBULOSAS
Virgo núm. 1	12°	2	+ 900	12,5	300 ±
Pegaso	1°	7	+ 3 800	15,5	100
Piscis	0°5	7	+ 4 600	15,4	20
Cáncer	1°5	9	+ 4 800	16,0	150
Perseo	2°	11	+ 5 230	16,4	500
Cabellera de B	2°	14	+ 7 500	17,0	800
Osa Mayor 1 .	0°7	23	+ 11 800	18,0	300
Leo	0°6	36	+ 19 600	19,0	400
Corona	0°5	38	+ 22 000	19 ±	400
Géminis	—	42	+ 24 000	19,5 ±	—
Boyero	—	70	+ 39 500	21 ±	—
Osa Mayor 2 .	—	73	+ 42 000	21 ±	—

(*) Región central más condensada (el diámetro extremo puede ser de dos a tres veces mayor).

Han podido apreciarse velocidades de más de 100 000 kilómetros/segundo para las galaxias más alejadas, resultado experimental que, al servir de comprobación a concepciones hasta entonces sólo teóricas, ha concedido de nuevo gran interés a estas especulaciones sobre la estructura del universo. Es difícil escoger en la actualidad entre las diversas teorías propuestas, aunque algunos resultados cuentan con la adhesión, si no de todos, de la mayoría de los científicos:

1° El universo es finito.

2° El universo no es estable, sino que se modifica en el transcurso del tiempo.

Se supone generalmente que ha pasado, en otras épocas, por un estado hiperdenso en que toda la materia estaba concentrada en un volumen restringido, y que desde entonces se encuentra en continua expansión, constituyendo la "huida" de las galaxias lejanas la materialización de esta expansión.

En todo caso, se ha podido calcular un orden de magnitud para ciertos valores numéricos.

El radio actual del universo es, al parecer, de unos cuantos miles de millones de años-luz (una decena), y su masa total sería de 2×10^{55} g ó 10^{22} soles. El estado hiperdenso se situaría aproximadamente hace 10 000 millones de años. Téngase en cuenta que este resultado es de un orden de magnitud aceptable con respecto a las estimaciones, hechas por otros métodos, para la edad de la Tierra (3 500 millones de años). En el estado hiperdenso la densidad habría alcanzado la cifra de ¡100 millones de toneladas por centímetro cúbico! Esto habría representado un gigantesco núcleo atómico, que, al explotar, engendraría el universo actual. Los rayos cósmicos que se observan actualmente serían entonces el residuo de la radiación producida durante esta explosión. Conviene señalar que esta radiación ha debido dar varias veces la "vuelta" al universo, desde la explosión inicial, habiéndose, por consiguiente, debilitado mucho.

André GUILLEMONAT



Locomotora eléctrica BB 9004 de la Sociedad Nacional de Ferrocarriles Franceses (*Doc. Fenino. «La vie du rail»*)

Aplicaciones de la Física

Viviendas y condiciones de vida

Calefacción

Definición. Teoría de la calefacción. Chimeneas. Estufas. Radiadores de gas. Radiadores eléctricos. — Calefacción central y calefacción urbana: por aire caliente, por agua caliente, por agua recalentada, por vapor, por vapor a baja presión, por vapor a media o alta presión, por vapor a presión subatmosférica, por paneles. Termobombas o bombas de calor. Otros medios de calefacción

Definición. — La calefacción es una técnica cuya finalidad es aumentar la temperatura del aire de un local hasta un valor conveniente para el organismo humano, y mantenerla en dicho valor, que varía según el uso a que se destine el local. Se admiten, por lo general, las cifras siguientes:

Locales de vivienda	21°-22°,	Salas de hospital	20°,
Escuelas	21°-22°,	Salas de operaciones	25°-26°,
Tiendas	18°-20°,	Cuartos de baño	24°,
Oficinas	21°-22°,	Iglesias	18°-20°.

Teoría de la calefacción. — El problema de la calefacción estriba, pues, en aumentar la temperatura del aire de un local hasta conseguir el valor deseado, y en mantener dicho valor a pesar de las pérdidas de calor que se producen a través de las paredes y las debidas a la ventilación; este problema supone, pues, el conocimiento de los fenómenos de transmisión del calor. Esta transmisión se efectúa por *conducción*, por *radiación* y por *convección*.

La *conducción* es la propagación del calor por una substancia sin desplazamiento de materia. Se observa fácilmente en los metales: si se calienta el extremo de una barra de acero, la barra se calienta progresivamente en toda su longitud. La transmisión del calor por conducción es proporcional a las diferencias de temperatura y a un coeficiente que caracteriza la conductibilidad de la substancia. Los cuerpos buenos conductores de la electricidad lo son también del calor; el aire es muy mal conductor.

La *radiación* es la propagación del calor en forma de radiaciones visibles o invisibles, y no se produce más que en los medios transparentes o en el vacío. La Tierra es calentada por el Sol únicamente por radiación. Para que un cuerpo se caliente como consecuencia de una radiación, es necesario que esta radiación pueda ser absorbida por ese cuerpo. El aire absorbe muy poco la radiación calorífica.

La energía emitida por radiación por una substancia dada es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura; la energía irradiada sólo llega a ser importante, por lo tanto, en los cuerpos muy cálidos. La radiación que emite un cuerpo es tanto mayor, para una temperatura dada, cuando mayor es la absorción. Los cuerpos mates y de color obscuro irradian más, para una misma temperatura, que los cuerpos brillantes o de color claro.

La *convección* es el fenómeno que se produce cuando un fluido está en contacto con un sólido de temperatura diferente; las partes del fluido en contacto con el cuerpo sólido se calientan por conducción, y las variaciones de densidad que de ello resultan provocan corrientes en el seno del fluido; estas corrientes transportan el calor a todo el fluido y sólo cesan cuando dicho fluido alcanza la misma temperatura que el sólido. La intensidad de las corrientes de convección depende de la forma del sólido en contacto con el fluido.

La propagación del calor se efectúa, en todos los aparatos de calefacción de esas tres formas, pero la propagación por convección es la más importante (estufas, radiadores de la calefacción central); por radiación sólo se propaga en la calefacción con chimeneas, en los radiadores eléctricos parabólicos y en los antiguos radiadores de gas. La propaga-

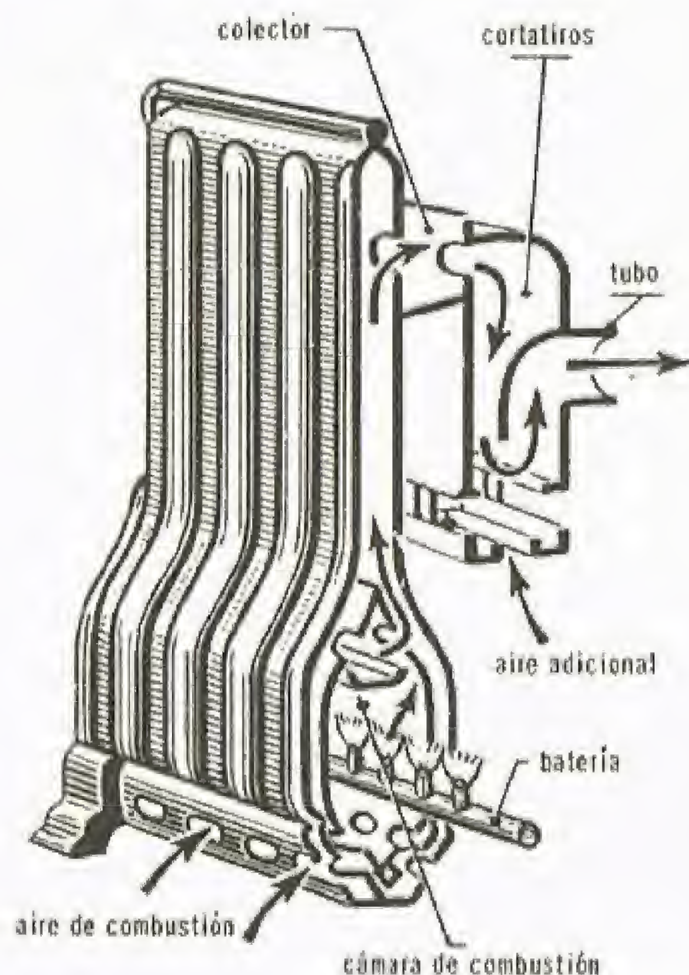
ción por conducción se tiene en cuenta únicamente en el cálculo de las pérdidas de calor del local y, por consiguiente, en lo que se refiere a la cantidad de calor que hay que producir para mantener la temperatura deseada.

Chimeneas. — Las chimeneas, ya conocidas en la Antigüedad, estaban constituidas por un semicono elíptico truncado construido con ladrillos y tubos en su parte superior; también se utilizaba un hogar redondo situado en el centro de la pieza, con un orificio en la parte superior para la salida del humo. La chimenea adosada a la pared data del siglo XII; el orificio en forma de embudo por donde sale el humo, que era de forma cónica en el siglo XII, se hizo en forma rectangular en el siglo XIII.

La calefacción de las viviendas mediante chimeneas no ofrece más ventajas que su facilidad de aireación, aparte de otros factores estéticos; su rendimiento, en cambio, es muy bajo (el 15%), ya que la mayor parte del calor se pierde, con el humo, por la chimenea.

Ciertos tipos de chimeneas, al provocar la circulación del aire, actúan como bocas de calor, lo que mejora el rendimiento de este sistema.

Estufas. — El hogar está dentro de un armazón de metal o de tierra refractaria. El calor se propaga en parte por radiación, pero principalmente por convección; su rendimiento varía entre el 40 y el 60 %. Sólo se pierde el calor de los gases de combustión que se evacuan por la chimenea. Unas estufas son de *combustión viva* y otras de *combustión lenta;* en las primeras —estufas de madera— toda la masa del combustible entra en combustión, y la cantidad de calor producida depende de la carga de la estufa, por lo cual es bastante irregular. Tiene la ventaja de que, siendo la combustión viva, no se produce más que gas carbónico, sin óxido de carbono, y por consiguiente no ofrece peligros serios de asfixia. En las estufas de combustión lenta sólo una parte del combustible está en combustión; la producción de calor es más regular y la estufa se carga sólo a largos intrevalos. En éstas, la reducción del gas carbónico de la combustión por el combustible no quemado puede ocasionar la formación de óxido de carbono; por lo tanto, existe peligro de intoxicación.



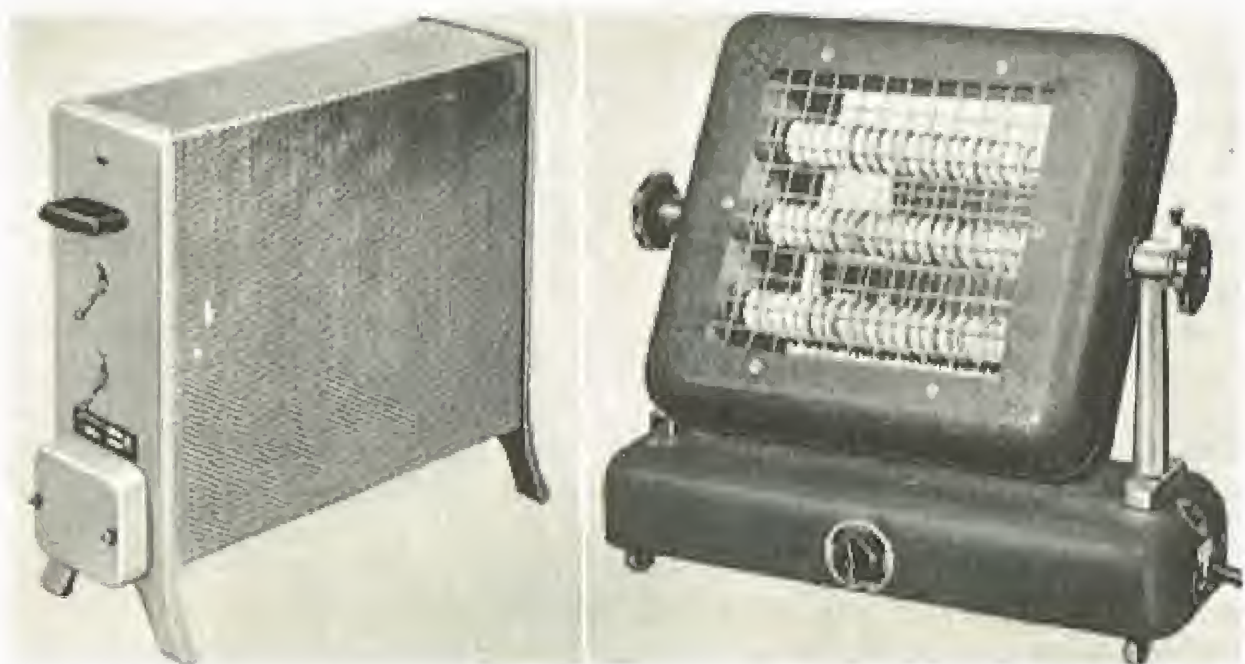
Radiador de gas, de radiación obscura y convección

Las estufas de combustibles líquidos —estufas de petróleo— no tienen chimenea para la evacuación de los productos de la combustión, que se expanden por la atmósfera del local calentado. El rendimiento calorífico es evidentemente perfecto, pero este modo de calefacción es poco higiénico.

Radiadores de gas. — Los antiguos radiadores de gas contenían materiales refractarios que la llama ponía incandescentes, utilizándose para calefacción el calor de estos materiales, propagado por radiación; actualmente suelen utilizarse radiadores compuestos de varios elementos tubulares, por los que circulan los gases de la combustión; estos gases ceden a los tubos la mayor parte de su calor antes de ser evacuados por la chimenea; la calefacción se produce pues, en este caso, por convección.

Radiadores eléctricos. — Se llaman *radiadores luminosos* todos aquellos aparatos provistos de resistencias que, bajo la acción de la corriente eléctrica, se ponen incandescentes, como los radiadores parabólicos o de reflector.

Algunos de ellos están constituidos por lámparas de filamento de carbono montadas delante de un reflector plano; otros llevan hilos resistentes, puestos al rojo, sobre una armazón en contacto directo con el aire; los hay, por último, que tienen hilos arrollados en espiral sobre elementos de tierra refractaria.


Dos modelos de radiador eléctrico: *a la izquierda*, radiador obscuro de elementos; *a la derecha*, chimenea luminosa (*Fot. Chevojon* y *Larousse*)

Los *radiadores obscuros* pueden ser de varios *tipos:* unos son los aparatos de circulación activa de aire por paredes calientes, constituidos por láminas de aluminio que recubren los conductores que proporcionan el calor, y que forman chimenea para que haya tiro. Otros tienen grandes superficies de irradiación, de formas semejantes a la de un radiador ordinario de calefacción central; por último, los hay también constituidos por tubos de acero verticales, estando los conductores arrollados sobre los tubos impares, colocados en chimeneas con aletas.

Calefacción central y calefacción urbana. — Bajo la denominación, muy general, de *calefacción central*, se incluyen todos los procedimientos de calefacción que permiten calentar varios locales por medio de un solo hogar.

Los diferentes tipos de calefacción central se clasifican según la naturaleza de fluido que se utilice para transportar el calor: aire, agua, o vapor.

Los aparatos utilizados para calentar los diferentes fluidos son los caloríferos (aire), las calderas (agua y vapor), alimentadas estas últimas con carbón, mazut, gas de alumbrado, o la electricidad (calefacción por acumulación).

La calefacción urbana es una calefacción central que se extiende no sólo a un inmueble sino a varios grupos de ellos.

La distribución del calor se hace por medio de grandes tuberías subterráneas, que atraviesan las calles. En cada inmueble hay puestos de empalme, midiéndose la cantidad de calor que consume cada usuario por medio de un contador. Los puestos de empalme son de tipos diversos, para que, sin tener en cuenta el sistema de calefacción utilizado, dicho empalme pueda efectuarse.

La red más antigua de calefacción urbana es la de Nueva York, que utiliza como fluido vapor a alta presión; en esta red, las aguas de condensación son evacuadas por el alcantarillado.

En París funciona también una red, ya importante, de calefacción urbana; el fluido utilizado es, igualmente, el vapor, siendo la presión de distribución 6 ó 15 kilogramos, según los casos. Las aguas de condensación son devueltas a la central por medio de bombas.

En la actualidad, las redes de distribución de calefacción urbana son muy numerosas, estando dotadas de ellas las principales ciudades, tanto de América como de Europa.

La calefacción urbana presenta un interés evidente: supresión del personal que requieren las calderas privadas, de las manipulaciones del combustible, de la necesidad para cada particular de prever el aprovisionamiento; además, se gana espacio en los sótanos al suprimirse los aparatos de calentamiento y los depósitos del combustible.

Calefacción por aire caliente. — Este tipo de calefacción, perfectamente adecuado a las necesidades de las ciudades pequeñas, ha sido sustituido paulatinamente por sistemas de calefacción por radiadores. A pesar de ello, este sistema, con caloríferos modernos bien estudiados, podría ser de gran utilidad, ya que asegura, al mismo tiempo que la calefacción, la ventilación de las habitaciones. Otra aplicación interesante de este tipo de calefacción es el calentamiento de grandes locales, como las iglesias.

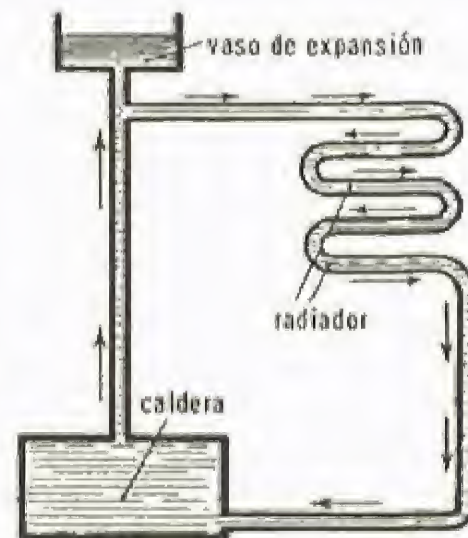


Fig. 598

Calefacción por agua caliente. — En su forma más sencilla, se compone de un hogar (caldera), de una red de tuberías de distribución en ambos sentidos que unen la caldera a los diversos cuerpos de calentamiento (radiadores) y de un aparato de seguridad (depósito de expansión) provisto de un dispositivo que sirve para compensar el aumento de volumen del agua al elevarse su temperatura (*fig.* 598). El agua circula por las tuberías, ya sea a causa de la diferencia de densidad —circulación natural, o termosifón—, o por medio de bombas centrífugas (circulación acelerada). Las pequeñas instalaciones funcionan con termosifón; las instalaciones importantes —grupos de inmuebles— utilizan en cambio sistemas a base de bombas, lo que permite aumentar la velocidad de circulación del agua y disminuir, por lo tanto, los diámetros de las canalizaciones. Este sistema de calefacción es el más utilizado corrientemente en Francia en los locales de vivienda, por no ser los edificios de ese país muy elevados. Ofrece la ventaja de una gran facilidad de regulación de la temperatura del fluido, en función de la temperatura que se desee en las piezas. En edificios de gran altura es difícilmente utilizable este sistema de calefacción a causa de la elevada presión a que están sometidos los elementos inferiores de la instalación.

Calefacción por agua sobrecalentada. — Así se designa un sistema de calefacción por agua caliente, cuyo recipiente de expansión, en lugar de estar abierto al aire libre —lo que limita la temperatura máxima de circulación del agua a un valor algo inferior a 100° (en la práctica las instalaciones se calculan para temperaturas máximas de 80°, 85° ó 90°, según los casos)—, está cerrado por una válvula provista de un contrapeso. Se pueden entonces construir instalaciones en las que el agua esté a una presión de varios kilogramos, lo que permite obtener temperaturas de circulación de más de 100°.

Este sistema de calefacción no es recomendable para los inmuebles, pero rinde grandes servicios en la industria y en el transporte del calor a distancia (calefacción urbana). Se han construido instalaciones con presiones que alcanzan los 20 kilogramos y con temperaturas para el

agua del orden de 200°; este sistema requiere la utilización de calderas especiales que resistan las altas presiones, y singulares precauciones de montaje.

Calefacción por vapor. — En este sistema se obtiene primero vapor que, al condensarse, cede su calor, volviendo el agua al calentador por una tubería especial de pequeño diámetro.

Las instalaciones de calefacción por vapor se clasifican según la presión máxima en la caldera: instalaciones a baja presión (menos de 300 g), a media presión (300 g a 4 kg) y a alta presión (más de 4 kg).

Calefacción por vapor a baja presión. — Este sistema es el que suele emplearse corrientemente en los inmuebles. La instalación se compone de una caldera, análoga a la de los sistemas de calefacción por agua caliente, y de una red de tuberías que la unen a los radiadores. En este sistema, el agua condensada suele volver a la caldera por gravedad. La calefacción por vapor a baja presión, que se utilizaba en gran escala hace solo algunos años en los inmuebles, tiende cada vez más, en Francia, a ser substituida —quizá equivocadamente— por la calefacción con agua caliente. Este tipo de calefacción presenta, en efecto, ventajas apreciables para numerosas aplicaciones: ausencia de peligro de congelamiento, rápida obtención del régimen para los locales de calefacción intermitente y radiadores de dimensiones reducidas. El desuso en que ha caído obedece probablemente a que es más difícil conseguir una instalación perfecta de vapor que de agua caliente.

Calefacción por vapor a media o alta presión. — El vapor a media o alta presión es poco utilizado para la calefacción central. El vapor procede, ya sea de calderas de un tipo especial o del vapor de escape de las turbinas. El vapor a alta o media presión se destina a la alimentación de aparatos especiales (lavaderos, aparatos de cirugía, etc.) o al transporte del calor a distancia (calefacción urbana).

Calefacción por vapor a presión subatmosférica. — En este sistema, relativamente reciente, se crea en las canalizaciones y radiadores una depresión parcial (vacío), y variable, mediante un grupo productor de vacío conectado a la tubería principal de retorno del agua. Por este procedimiento se obtiene vapor a temperaturas inferiores a 100°, que pueden incluso descender hasta 60°. Reúne las ventajas de los sistemas por vapor y por agua caliente, pudiendo emplearse en cualquier tipo de edificios, en particular los de mayor altura (rascacielos).

Calefacción por paneles. — En este sistema se utiliza como medio de propagación del calor, en vez de radiadores más o menos disimulados, serpentines encastrados en los techos o bajo el suelo. El fluido transmisor del calor suele ser, por lo general, agua.

También se emplea vapor a baja presión o aire caliente que circula por conductos practicados en las paredes, y resistencias eléctricas encastradas en la mampostería.

Este sistema es, evidentemente, el más racional y elegante, pero su instalación es costosa.

Termobombas o bombas de calor. — En realidad son aparatos de refrigeración que enfrían un fluido exterior y transportan su calor al aire del local que hay que calentar. La figura 599 muestra el esquema de una termobomba; es idéntico al de un aparato frigorífico provisto de compresor (v. p. 187). El fluido circula en el sentido de las flechas, y suele ser cualquiera de los que se utilizan en los aparatos frigoríficos (freón, anhídrido sulfuroso).

El fluido comprimido se envía en estado gaseoso al condensador, en el cual se licuida, cediendo al aire ambiente, por convección, su calor de vaporización; después pasa, por medio de la válvula de expansión, al evaporador, en el cual se vaporiza, absorbiendo calor al medio ambiente y volviendo a comenzar el ciclo.

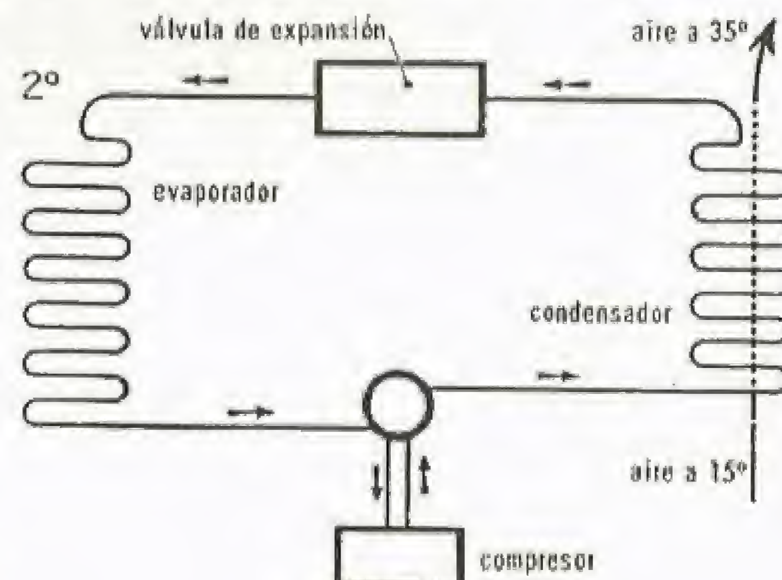


Fig. 599

El evaporador se calienta con una fuente de calor abundante, pero a temperatura poco elevada; esta fuente puede ser el agua de un río, de un lago, de un pozo, el Sol o aguas templadas procedentes de máquinas industriales. La instalación del Instituto Federal Tecnológico de Zürich utiliza como fuente de calor el río Limmat, que en invierno tiene una temperatura de 2°. Los dos tercios del calor proceden del río, y el tercio restante de la transformación en calor del trabajo del compresor.

La diferencia entre la temperatura del evaporador y la del condensador no debe exceder de 75 a 80°.

Téngase en cuenta que, si se invierte el ciclo del fluido, la termobomba se convierte en un refrigerador, por lo que puede utilizarse para calentar un local, en invierno, y para enfriarlo en verano.

Otros medios de calefacción. — Se han preconizado diversos medios de calefacción, principalmente la energía solar recogida mediante agua calentada en recipientes expuestos al sol. El aire, extraído del suelo en pozos más o menos profundos, puede también servir para la calefacción en invierno y para la climatización en verano. Se han construido varias instalaciones de esta clase, pero todavía no se han generalizado.

La refrigeración

Reseña histórica. Definición. — **La producción artificial de frío.** Reseña histórica y generalidades. Fluidos frigoríficos. Máquinas frigoríficas: máquinas de absorción; máquina de compresión. Ciclo de funcionamiento de una instalación. Compresores giratorios. Turbocompresores. El frío en el hogar. Fabricación de hielo. Cámaras frías. Conservación de los alimentos

Reseña histórica. — Durante mucho tiempo se ha adolecido de un deficiente conocimiento de las bajas temperaturas, que solía únicamente limitarse al de los fríos que pueden observarse en la superficie del globo o los que se producen con mezclas refrigerantes, ya antiguamente conocidas, que permiten descensos de temperatura desde los treinta grados hasta por debajo del cero.

En la segunda mitad del siglo XV, los físicos, utilizando la expansión de los gases comprimidos y los cuerpos liquidables a baja presión, llegaron a obtener, combinando la compresión y el enfriamiento, temperaturas cada vez más bajas.

En 1877, **Cailletet** (1832-1913) y **Pictet** (1846-1929) obtuvieron el oxígeno líquido; **Kamerlingh Onnes** (1853-1926) consiguió liquidar el helio a —272°, y **Keesom**, su sucesor, llegó a obtener, en 1932, la temperatura de 0,71 por encima del cero absoluto. Por último, en 1936, **Laîné, Simón, Kurti** y **Rollin** alcanzaron, gracias al electroimán de Bellevue (el más potente del mundo: 130 toneladas de fuerza de atracción), el "cero absoluto", con una aproximación de una centésima de grado.

La manera de producir artificialmente el frío fue, desde hace tiempo, la constante preocupación de los científicos: en 1685, **La Hire** (1640-1718) descubrió las propiedades refrigerantes de la sal de amoniaco; en 1775, **Cullen** produjo frío por medio de la máquina pneumática; en 1811, **Lestre** consiguió producirlo utilizando el ácido sulfúrico; finalmente, en 1857, **Carré,** de Marsella, construyó una máquina que permitía obtener una reducción constante de la temperatura (hasta —30°) por evaporación del amoniaco.

Los trabajos de **Cailletet, Pictet** y **Georges Claude** (1870-1960) contribuyeron de modo importante al desarrollo de esta aplicación científica.

En 1876, Raul Pictet mostró que era posible utilizar el anhídrido sulfuroso como fluido productor de frío y, en 1880, **Vincent** (1862-1950) descubrió la misma propiedad en el cloruro de metilo.

Pero el creador de la industria frigorífica es **Charles Tellier** (1828-1913), llamado "el padre del frío". En 1876 equipó un navío, el *Frigorífico,* que transportó carne congelada desde Rouen a Buenos Aires, regresando después a El Havre con un cargamento perfectamente conservado; al año siguiente, y con el mismo éxito, hizo un viaje de ocho meses con un navío mayor, el *Paraguay;* desde entonces, la industria del frío ha experimentado un incremento constante.

Citemos, por último, otro medio de obtener frío: **Georges Claude** y **Boucherot** mostraron que, elevando a la superficie de los océanos tropicales, que está a una temperatura de 30° aproximadamente, el agua fría (4°) que se encuentra a 1 000 metros de profundidad, se dispondría en la superficie de dos fuentes de temperatura: la diferencia entre ambas podría utilizarse para producir fuerza motriz. Este procedimiento permitiría obtener una cantidad extraordinaria de *frigorías,* hecho que, en aquellos países donde el gran enemigo del hombre es el calor, sería de decisiva importancia.

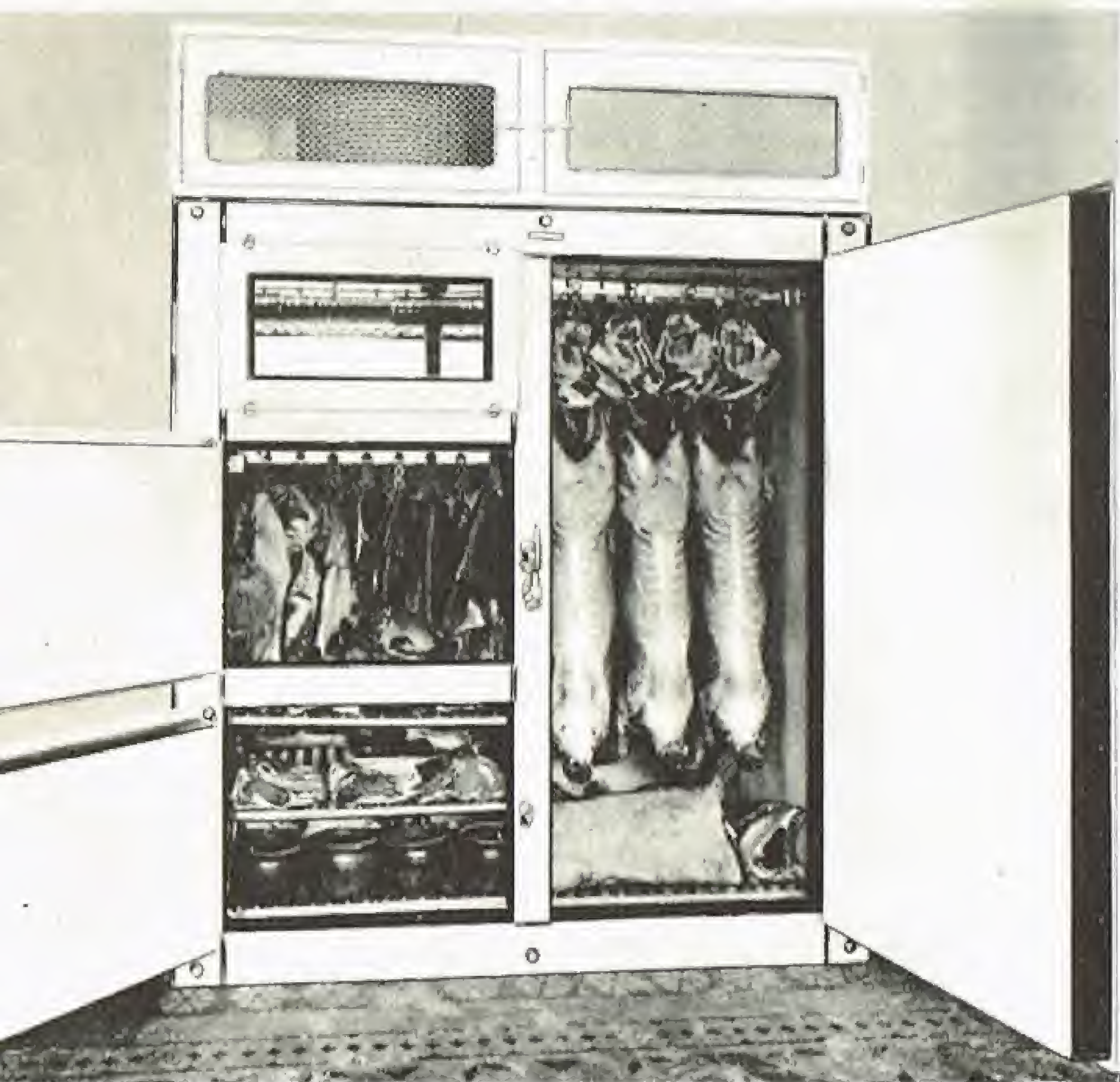
Definición. — La refrigeración es la técnica cuya finalidad es rebajar la temperatura de un espacio cerrado; se recurre a ello, principalmente, para la conservación de los alimentos, aunque modernamente viene también empleándose para bajar, en verano, la temperatura de los locales habitados.

El frío es el medio más adecuado para conservar materias sin alterar su naturaleza. En efecto, contrariamente a lo que sucede con la esterilización por el calor y con la desecación, permite conservar intactas las vitaminas de los alimentos frescos, sin alterar su sabor.

Las bajas temperaturas reducen e incluso suprimen la acción y la multiplicación de los microorganismos, pero no los destruyen. El frío estabilizador puede aplicarse tanto a la materia inerte como a la materia viva; permite la inmovilización de la primera, y la suspensión de los fenómenos vitales de la segunda. No se trata de una suspensión definitiva de estos diversos fenómenos, sino simplemente de una fuerte reducción de su actividad, tanto mayor cuanto más baja es la temperatura. De ahí la posibilidad de graduar entre amplios límites la acción del frío, según los resultados que deseen obtenerse.

La producción artificial de frío

Reseña histórica y generalidades. — El primer medio para la producción de frío fue la fusión del hielo, que se obtenía entonces de las fuentes naturales: la nieve de las montañas y de los glaciares.



Frigorífico de una carnicería (*Fot. Images*)

Los romanos conservaban la nieve y era, al parecer, de esta forma como refrescaban las bebidas de sus banquetes.

En el siglo XVI empezaron a aparecer en Francia las explotaciones del hielo natural, que se almacenaba en invierno en subterráneos para servir, en el verano, para la refrigeración; más adelante, al perfeccionarse los medios de transporte, se recurrió a la explotación directa de los glaciares, que proporcionaban una reserva inagotable de hielo para el consumo estival. El hielo de los Bossons, cerca de Chamonix, continuaba todavía explotándose a principios de nuestro siglo.

El hielo se produce en la actualidad industrialmente y se vende para utilizarlo en los refrigeradores, que son recipientes aislados térmicamente, con dos compartimentos; el tabique de separación es conductor, colocándose el hielo en uno de los compartimentos y los productos que hay que enfriar en el otro. Estos productos ceden su calor al hielo, que se funde paulatinamente. Un conducto de evacuación permite retirar el agua de fusión.

También se utiliza, en lugar de hielo, nieve carbónica, por razones de comodidad: ésta presenta, en efecto, la ventaja de sublimarse sin fundirse y, por consiguiente, sin dejar ningún residuo líquido, por lo cual puede ponérsela directamente en contacto con los productos que hay que refrigerar. Es mucho más costosa que el hielo, pero permite refrigeraciones más intensas.

También se han utilizado mezclas refrigerantes, algunas de las cuales citamos a continuación:

		El termómetro desciende desde
1. Hielo machacado ... 2 partes Cloruro de sodio ... 1 »		0 a -20°, 6
2. Hielo machacado ... 1 » Carbonato de sodio... 1 »		0 a -20°
3. Hielo machacado ... 1 » Ácido clorhídrico ... 1 »		0 a -32°, 8
4. Sulfato de sodio ... 6 » Nitrato de amonio ... 5 » Ácido nítrico diluido 4 »		-10 a -40°

El frío que produce la expansión del aire comprimido ha sido utilizado en máquinas, abandonadas hoy por su mal rendimiento. La producción de frío, en el momento actual, se obtiene solamente por evaporación de líquidos convenientemente escogidos. El vapor así producido se recoge, se liquida de nuevo y así sucesivamente. Los aparatos que realizan este ciclo son los que vamos a exponer con más detalle.

Fluidos frigoríficos. — La cantidad de calor absorbida para vaporizar la unidad de masa de un líquido a su temperatura de ebullición, bajo una presión dada, depende de la naturaleza de la substancia que se utilice: es lo que se denomina calor latente de vaporización del líquido, a la temperatura y bajo la presión dadas.

Fácilmente se comprende que, en igualdad de las restantes condiciones, un líquido absorberá para vaporizarse tanto más calor cuanto mayor sea su calor latente de vaporización. Una de las primeras condiciones que tiene que reunir un líquido frigorífico será, pues, un gran calor latente de vaporización. Es también necesario que su punto de ebullición sea lo suficientemente bajo para que se vaporice fácilmente: su punto de congelación debe ser muy bajo, para que no ofrezca ningún peligro de solidificación en los conductos. También es necesario que pueda liquidarse bajo una presión no demasiado elevada, que su calor específico en el estado de vapor sea grande, y que su viscosidad en el estado líquido sea pequeña. Debe ser igualmente poco costoso, estable, no tóxico, ni corrosivo y disolvente, si es posible, de los aceites de engrase, así como fácilmente detectable en caso de escape en los aparatos.

En estas condiciones, se comprenden las limitaciones que presenta la elección de un líquido frigorífico; en realidad, se utilizan casi exclusivamente los siguientes compuestos:

El anhídrido carbónico (CO_2), que hierve a — 78° a la presión atmosférica;

El cloruro de metilo, que hierve a — 23°;

El amoniaco (NH_3), que hierve a — 34°;

El anhídrido sulfuroso (SO_2), que hierve a — 10°;

Compuestos orgánicos clorofluorados, que se conocen con el nombre de freones, y que comprenden los siguientes cuerpos:

CCl_3F, CCl_2F_2, $CClF_3$, $CHCl_2F$, $CHClF_2$. CCl_2F — $CClF_2$, $C_2Cl_2F_4$.

El más empleado es el freón 12: CCl_2F_2.

También se utilizan, aunque más raramente, el propano y el butano.

En las instalaciones importantes se utiliza principalmente el amoniaco, que presenta, sin embargo, como inconveniente, el no disolver el aceite (lo que requiere un aparato especial para el circuito completo del aceite) y atacar el cobre y sus aleaciones.

En las instalaciones "comerciales", grandes restaurantes, carnicerías, charcuterías..., donde la potencia del motor eléctrico es inferior, o todo lo más igual, a 10 HP, los constructores utilizan con preferencia el anhídrido sulfuroso (SO_2), y el más moderno de los fluidos frigoríficos: el freón.

Máquinas frigoríficas. — Las únicas utilizadas en la actualidad son las de absorción y las de compresión. En las primeras, el vapor del fluido frigorífico es absorbido por disolución en un solvente; este solvente es acto seguido calentado, y restituye el vapor a una presión tal, que se liquida después de ser enfriado por el aire ambiente o por una circulación de agua.

En las máquinas de compresor, éste comprime el vapor del fluido, que se liquida bajo el efecto de esta presión, después de enfriado por el aire ambiente.

Las máquinas de absorción pueden funcionar con una fuente de calor cualquiera: existen aparatos de este tipo que funcionan con gas, con petróleo o con electricidad.

Las máquinas de compresores exigen un motor, que suele ser eléctrico.

Máquinas de absorción. — Estas máquinas se basan en la gran solubilidad del gas amoniaco (1 l a cero grados se disuelve en 1 040 l) y en la propiedad que tiene el agua de restituir todo el gas amoniaco que contiene a una temperatura de aproximadamente 70°; el gas que se escapa entonces tiene una presión suficiente para poder condensarse por sí mismo; basta a continuación con evaporar este líquido para producir el frío deseado, mientras que se hace absorber de nuevo el gas formado por el agua.

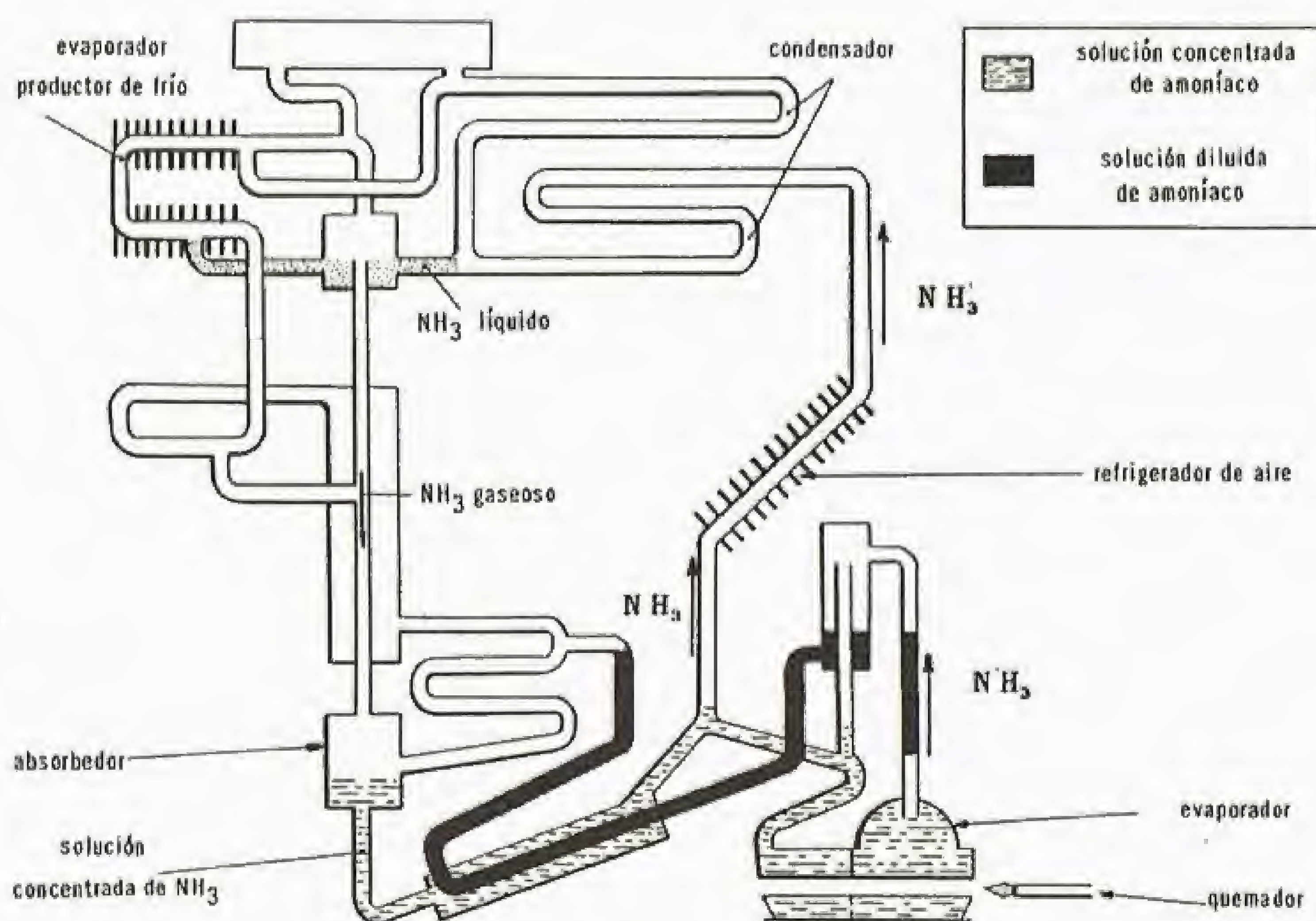


Fig. 600

La disolución del gas en el agua se efectúa en *absorbedores* o *saturadores*. Cuando se ha saturado este agua, es enviada a un hervidor, calentado continuamente por una circulación de vapor de agua, en el que se desprende el gas amoniaco, junto con un poco de vapor de agua; este gas es conducido a un condensador, en donde se liquida bajo su propia presión, enviándose el amoniaco líquido, merced a un sistema

regulador, al serpentín evaporador, en el cual se vaporiza, enfriando la salmuera en que está inmerso el serpentín (*fig.* 600).

Las máquinas de absorción no son económicas; hay que calentar cada vez que se emplean toda la solución hasta la temperatura de destilación. Además, son voluminosas, y requieren para la refrigeración grandes cantidades de agua fría, siendo delicada su regulación y difícil de obtener la impenetrabilidad de las juntas a causa de las grandes variaciones de presión anejas a débiles variaciones de temperatura en la caldera y el absorbedor.

Debe citarse el perfeccionamiento de **Geppert,** bien adaptado por **Platen** y **Munters** a los aparatos de poca capacidad; este perfeccionamiento consiste en mezclar con el amoniaco un gas indiferente, lo que permite que el sistema conserve una presión uniforme en sus órganos y funcione de forma continua.

Las máquinas de absorción ya no se utilizan en la industria corriente, y se encuentran todavía en las pequeñas instalaciones domésticas, bajo dos tipos diferentes: de función intermitente y de función continua, mezclando el amoniaco con un gas indiferente.

J. Maiuri realizó estos últimos años mejoras muy importantes en las máquinas de absorción de media y gran potencia, inspirándose en consideraciones teóricas relativas a la máquina de absorción reversible, dadas a conocer por **Altenkirch** en 1913.

El hervidor y el rectificador se modificaron hasta poder realizar un funcionamiento reversible y una purificación completa de los vapores del amoniaco, que llega al 99,9%.

El absorbedor perfeccionado funciona bajo presiones absolutas muy reducidas (0,06 atmósferas). Este tipo de absorbedor se presta muy bien a las recuperaciones de calor.

La máquina de absorción de una sola fase puede utilizarse siempre que la diferencia entre las temperaturas de evaporación y de condensación no exceda de 70° C; empleando vapor de agua a alta presión puede conseguirse una diferencia de 80° C. En los casos en que no se dispone de este vapor, como por ejemplo cuando se utiliza vapor de escape, están indicadas las máquinas de absorción de dos fases.

Para obtener temperaturas muy bajas, de — 100° C a — 150° C, se prevé el empleo de una máquina de absorción *en cascada*, trabajando el ciclo superior con el sistema binario amoniaco-agua y utilizando en el ciclo inferior un agente frigorífico a muy baja temperatura de evaporación, en combinación con un absorbente apropiado.

Máquina de compresión. — El principio de esta máquina es la evaporación de un líquido, fluido frigorífico, con recuperación de este líquido por compresión, refrigeración y liquidación a la tensión de vapor saturada.

El aparato frigorífico consta esencialmente de un evaporador, colocado en la cámara fría, de un compresor y de un condensador, a los que se añaden: un motor eléctrico, un interruptor automático y un órgano de regulación del caudal del fluido en el evaporador (flotador).

Ciclo de funcionamiento de una instalación. — Tomaremos como ejemplo un compresor bicilíndrico de condensación por aire (*fig.* 601), que utiliza como fluido refrigerante anhídrido sulfuroso, SO_2, y con circulación de aire natural.

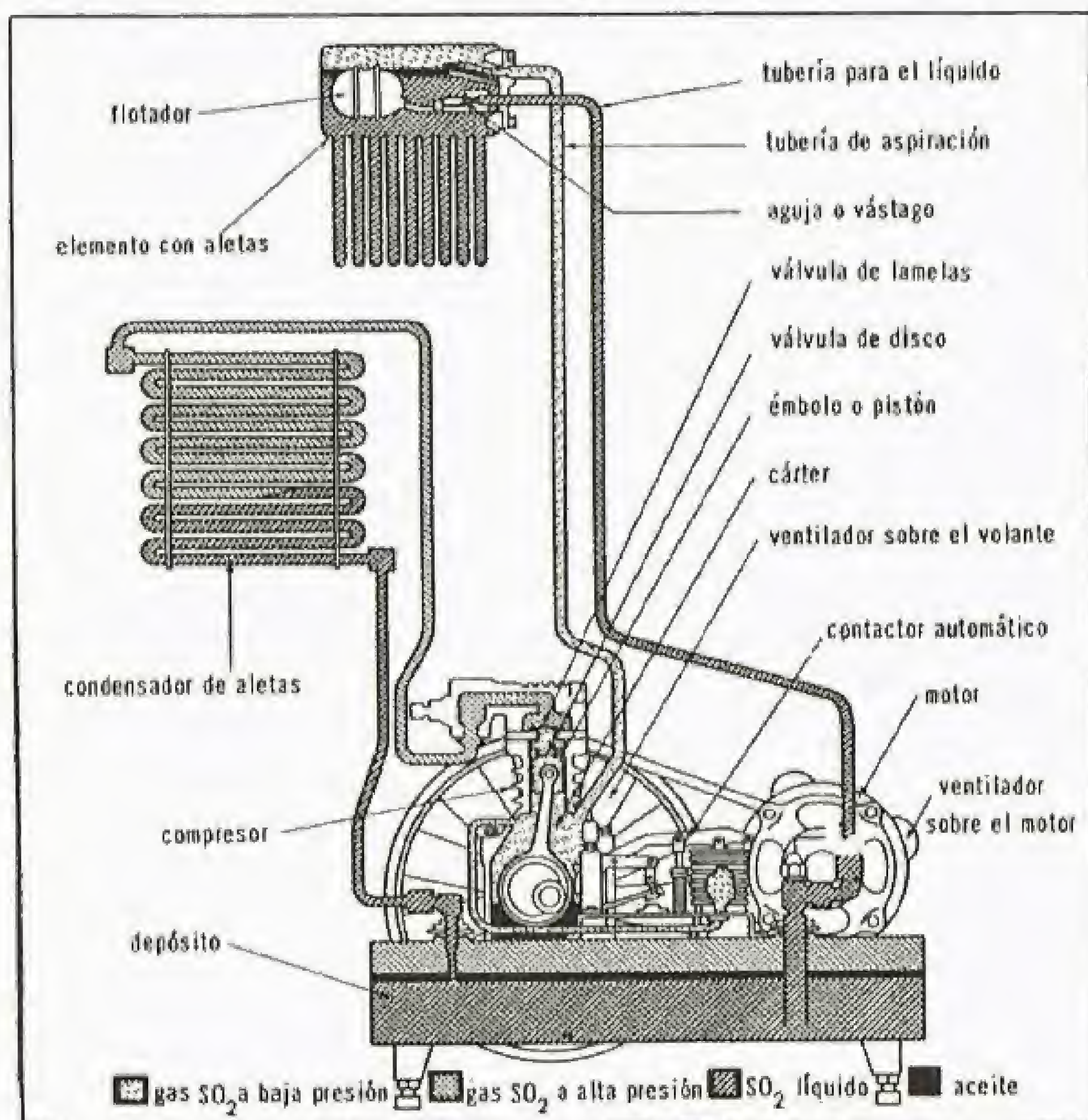


Fig. 601.—Ciclo de funcionamiento de una instalación frigorífica de compresión

El calor que penetra en la cámara fría por las paredes, así como el que ceden en el interior de la misma los productos introducidos, es transmitido por la circulación de aire al evaporador, que está frío. Como el evaporador contiene anhídrido sulfuroso líquido, cuyo punto de ebullición es — 10° C a la presión atmosférica, absorbe el calor que existe en el interior del refrigerador, calor que provoca la ebullición y, por consiguiente, la evaporación del SO_2. Esta evaporación, consecuencia de la ebullición, continúa hasta que la cantidad de vapor que se ha formado sea suficiente para aumentar la presión en el interior del evaporador y elevarla a una temperatura determinada (400 g/cm²).

Del evaporador, la presión es transmitida por el conducto de aspiración al fuelle del interruptor, que se dilata y cierra el circuito eléctrico del motor, el cual, por medio de una correa, acciona el compresor.

He aquí, descritas en detalle, cada una de las operaciones:

La válvula de admisión se abre durante la trayectoria descendente del pistón, permitiendo que el vapor de SO_2 pase al interior del cilindro. La válvula se cierra durante la trayectoria ascendente, y mientras sube el pistón, el anhídrido sulfuroso es primaremente comprimido y, al final de la trayectoria, rechazado hacia el condensador a través de la válvula de compresión.

El anhídrido sulfuroso, vapor procedente del evaporador, reduce, por absorción, el calor que existía en el refrigerador; su temperatura aumenta a causa de la compresión que ha sufrido en el compresor, y es entonces expulsado hacia los tubos del condensador; cuando la temperatura del gas comprimido llega a ser mayor que la del medio ambiente —aire en el caso presente, y agua si se trata de un compresor con condensación por agua—, el calor pasa del gas al aire, produciéndose por esta causa, la condensación del SO_2. El intercambio térmico está facilitado, además, por un ventilador montado en el árbol del motor.

El anhídrico sulfuroso así liquidado se acumula en el depósito y, al encontrarse bajo presión, asciende por el interior del conducto líquido hasta la aguja. Como el SO_2 del interior del evaporador está continuamente en ebullición, su nivel desciende y hace que descienda también el flotador, que abre la aguja, permitiendo así la admisión de una cantidad de SO_2 líquido suficiente para restablecer el nivel primitivo. El compresor, al girar, produce el vacío en el evaporador, y cuando este vacío alcanza lo previsto, el fuelle del contactor se aplana y corta el circuito eléctrico, deteniendo el compresor.

Compresores giratorios. — Para las potencias medias se emplean compresores rotatorios que, siendo de volumen reducido, aspiran grandes cantidades de vapor de un fluido de poca densidad. El tipo rotatorio consta de un cilindro inmóvil (*figura* 602) [estátor], en el cual desembocan los tubos de aspiración y de compresión de los vapores frigorígenos, y en cuyo interior se dispone un cilindro móvil (rotor), descentrado con respecto al estátor, provisto de álabes que pueden entrar y salir en correderas especiales. Durante el movimiento del rotor, los álabes frotan contra las paredes internas del estátor y delimitan compartimientos de volumen variable. El volumen máximo se produce cuando uno de los compartimientos está en comunicación con el tubo de llegada de los vapores frigoríficos: hace entonces de cámara de aspiración. La rotación del rotor disminuye considerablemente este volumen, comprimiendo el vapor en él situado, que es enviado al tubo de compresión cuando el volumen es mínimo.

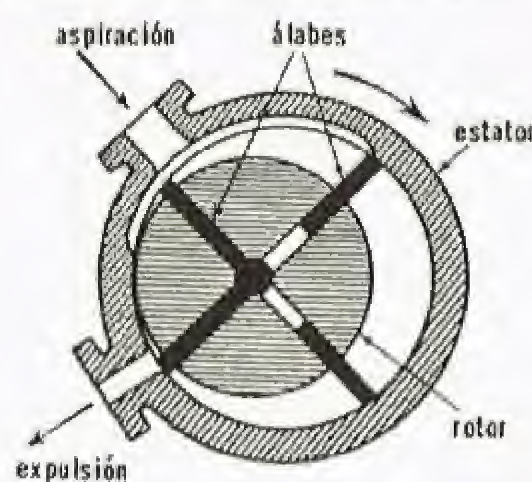


Fig. 602

La lubricación de los compresores es muy importante: el aceite debe conservar una viscosidad satisfactoria, aunque sufra grandes variaciones de temperatura (120°); el aceite tampoco debe destilar.

Turbocompresores. — También se utilizan turbocompresores para potencias frigoríficas del orden de varios millones de frigorías por hora.

La compresión se realiza en múltiples fases. El vapor que sale del evaporador penetra en el interior del eje de rotación y llega al centro de la primera rueda, cuya rotación lo rechaza hasta la periferia, con lo cual adquiere una cierta presión. Después de pasar por un primer refrigerador, es enviado a la cámara siguiente, llegando al centro de la segunda rueda, que lo envía a la periferia aumentando su presión, y así sucesivamente. Como el turbocompresor gira a gran velocidad, se obtienen grandes potencias frigoríficas.



Frigorífico (*Fot. Bonnet*)

El frío en el hogar. — El refrigerador eléctrico es objeto de muchas aplicaciones domésticas.

El principio del ciclo de funcionamiento es análogo al que se ha descrito antes. Existen dos ciclos de absorción, pero los compresores de émbolos alternados, o giratorios, son los más favorecidos por los constructores porque son más sencillos y también porque los gastos de funcionamiento son menores.

Algunos armarios de buena construcción están provistos de un motor eléctrico de 1/12 HP, que corresponde a un consumo horario de 85 vatios, aproximadamente.

El evaporador lleva pequeños cajones con separaciones que permiten la formación de pequeños cubos de hielo.

Fabricación de hielo. — El hielo se fabrica en moldes o recipientes metálicos, de forma troncopiramidal, colocados en un depósito térmicamente aislado que contiene salmuera incongelable (entre — 5 y — 10° C), la cual es refrigerada por el serpentín evaporador de una máquina frigorífica. Los moldes de una misma fila, ligados a un mismo chasis, son recogidos por un puente rodante y, una vez extraídos del depósito, pierden la forma en un recipiente de desmoldamiento lleno de agua caliente.

Cámaras frías. — La cámara fría es un recinto que se mantiene a una temperatura bastante inferior a la exterior por medio de una cámara frigorífica: el armario de un refrigerador doméstico o nevera es una cámara fría. Se construyen de dimensiones muy grandes, a fin de poder conservar alimentos, principalmente carne. Algunos barcos y vagones de ferrocarril van provistos de cámara fría.

Las paredes que limitan la cámara fría deben impedir la entrada del calor del exterior, es decir, los materiales de estas paredes deben tener un bajo coeficiente de conductibilidad. Entre los numerosos materiales existentes, llamados aisladores, pueden citarse la lana mineral, la fibra de madera comprimida en paneles, el hormigón celular, el corcho aglomerado con materiales elásticos y el corcho puro.

La cámara fría está compuesta de un armazón de listones que se apoyan sobre dos paredes que forman escuadra. El material de relleno lo constituyen dos capas de aislador, que se colocan disponiendo las juntas en sentidos contrarios, a fin de evitar el paso del aire; además, para impedir que se deteriore el corcho, se cubre éste con una capa de material hidrófugo —alquitrán de petróleo— que no resulte quebradizo a la temperatura interior de la cámara fría. Sobre la pared así constituida se fija un enrejado que servirá de soporte a una capa de mortero de cemento portland, cubierto con otra capa de cemento blanco o de azulejos. Para que el suelo tenga la suficiente dureza, se cubre el corcho con una baldosa de hormigón de 4 a 5 cm de espesor, cubierta a su vez con un mortero de cemento.

Conservación de los alimentos. — En la actualidad se transportan por barco y en vagones frigoríficos numerosos artículos alimenticios: carne, pescado, mantequilla, margarina, huevos, frutos y legumbres frescas, que a veces se conservan durante mucho tiempo en instalaciones frigoríficas hasta el momento de su consumo.

Sin el recurso del frío artificial, por ejemplo, no sería posible fabricar en los países cálidos conservas de buey envasadas.

La carne se transporta ya refrigerada, ya congelada: en el primer caso, se coloca simplemente en locales especiales (barcos, vagones, cámaras frigoríficas), en donde el aire, con el grado de humedad conveniente, se mantiene a la temperatura de 0°. Así puede conservarse tres semanas. En el segundo caso se solidifica con aire frío, primero a — 15° y después a 7°. Puede conservarse en este estado durante un año.

El pescado se transporta ya conservado en hielo, ya congelado por inmersión en una salmuera a — 25° y después en agua a 0°, que provoca la formación de una capa de hielo alrededor de su cuerpo; después se asegura su conservación a — 8°.

Los huevos procedentes de China se transportan en recipientes que se mantienen a — 7° de temperatura. Los frutos y legumbres se conservan a temperaturas que varían entre — 1° y 10°, según los casos.

Acondicionamiento del aire

Definición. — Esta técnica tiene por objeto conseguir que la atmósfera de un local alcance una temperatura, pureza y grado de humedad determinados y mantenerla en esas condiciones, con diversas finalidades, a saber:

1° Hacer agradable la estancia en una habitación o en un lugar de trabajo;

2° Conservar productos alimenticios o de otra clase, que en condiciones diferentes se alterarían;

3° Poder manipular productos sensibles al calor, al frío o a cierto grado de humedad.

Los medios empleados son análogos en todos los casos. Expondremos solamente, y en forma sucinta, el acondicionamiento del aire en los locales de vivienda.

Climas favorables al hombre. — El hombre sólo puede vivir a temperaturas que no excedan ciertos límites: — 40° y + 55° son los límites extremos, si bien en los climas que se consideran saludables para la especie humana estos límites son todavía más reducidos. En condiciones óptimas, las temperaturas sólo oscilan unos pocos grados alrededor de los 20°, con un 20 al 30°% de humedad. Sin embargo, hay que tener en cuenta las condiciones exteriores: una habitación a 20° parecerá glacial en verano si la temperatura exterior es de 30°. El acondicionamiento del aire de un local habitable no deberá ser, pues, uniforme todo el año, sino que habrá que tener en cuenta las estaciones y amoldarse a las variaciones de la temperatura exterior.

Medios empleados. — El aire deberá, en todo momento, estar exento de polvo, y para eliminarlo se recurre a lavados de agua, vertiéndola en forma de lluvia ya de filtros secos, ya de filtros viscosos; en este último caso, se hace pasar el aire a través de capas aceitosas muy viscosas que retienen el polvo; también puede recurrirse a la precipitación eléctrica del polvo, haciendo pasar el aire entre las placas de un condensador de potencial elevado.

La operación siguiente es calentar o enfriar el aire, que se realiza por cualquiera de los medios antes expuestos (v. CALEFACCIÓN y REFRIGERACIÓN). Por último, convendrá darle el grado higrométrico deseado, para lo cual habrá que secar el aire o humedecerlo: para secarlo, se le hace atravesar cuerpos desecantes —cloruro de calcio, silicagel— o se condensa el agua sobrante por medio de un aparato frigorífico; para humedecerlo, se le pulveriza agua en forma de niebla.

El alumbrado

Reseña histórica. Generalidades. Unidades fotométricas. — **Alumbrado por incandescencia:** Leyes de la radiación por incandescencia. Lámparas de combustión. Cirios, velas, bujías. Lámparas de combustibles líquidos. Lámparas de acetileno. Alumbrado de gas. Alumbrado eléctrico por incandescencia: lámparas de arco, de incandescencia. — **Alumbrado por luminiscencia:** Generalidades. Tubos luminiscentes de alta tensión. Lámparas con régimen de arco. Tubos fluorescentes

Reseña histórica. — El hombre prehistórico no podía alumbrarse más que encendiendo materias combustibles, que escogía entre las más ricas en carbono: en efecto, las partículas de carbono, renovadas sin cesar, son las que, puestas en incandescencia durante muy breve tiempo emiten antes de quemarse, radiaciones luminosas y confieren a la llama su poder de iluminación.

En la remota Antigüedad, el alumbrado se conseguía por medio de braseros colocados en trípodes, de antorchas sostenidas por hombres, de lámparas de aceite cuyos primeros tipos datan de los fenicios. En la época romana era conocido el aceite mineral; las velas de sebo se empleaban en el período clásico, y eran de uso corriente las linternas portátiles, cuya luz se protegía del viento con telas impregnadas de aceite o vejigas. En la Edad Media los procedimientos de alumbrado no sufrieron variación: antorchas, velas de cera o de sebo. Los candelabros empezaron a utilizarse en el siglo IV. En las iglesias, el alumbrado alcanzó un alto grado de desarrollo: candelabros y suspensiones diversas extendían la luz producida por cirios o por aceite. **Cardan** (1501-1576), fue quien primeramente perfeccionó las lámparas. En 1787, **Argand** (1755-1803) inventó la lámpara de doble corriente de aire, explotada por **Quinquet.**

Generalidades. Unidades fotométricas. — El alumbrado ha adquirido, dadas las actuales condiciones de vida, una gran importancia en los locales de vivienda, lugares de trabajo, estudios de cinematografía y televisión y faros de navegación náutica o aeronáutica.

Tres unidades permiten comparar mutuamente las diversas fuentes de luz. La bujía decimal, unidad de intensidad, es igual a la radiación de un cuerpo negro de 1,66 milímetros cuadrados de superficie, a la temperatura de solidificación del platino. Un cuerpo negro es un cuerpo ideal capaz de absorber toda la radiación que emite; supongamos esta fuente, de 1 bujía, situada en el centro de una esfera de un metro de radio, y sobre un cono de manera que delimite en la esfera una superficie de un metro cuadrado. La energía luminosa irradiada por esta fuente es, por definición, igual a la unidad: es el *lumen*. Una superficie de 1 metro cuadrado que reciba uniformemente un flujo de 1 lumen está iluminada de 1 *lux*.

La iluminación de un buen alumbrado interior no excede de 100 lux de iluminación; con cielo muy claro, en primavera y al medio día, la iluminación del sol en el exterior es de 100 000 lux.

Todas estas nociones sólo se aplican a las radiaciones que puede percibir el ojo humano, es decir, aquellas cuyas longitudes de onda están comprendidas entre 4 000 y 8 000 angstrœms.

Las fuentes luminosas se clasifican en dos grandes categorías, según utilicen la radiación por incandescencia o la radiación por luminiscencia.

Alumbrado por incandescencia

Leyes de la radiación por incandescencia. — Todo cuerpo a temperatura superior a la del cero absoluto (— 273° C) produce radiaciones. Esta irradiación no se hace visible más que hacia los 500° y las longitudes de onda que la componen están comprendidas entre límites que varían con la temperatura del cuerpo. La energía total radiada es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo *(ley de Stéfan)*; pero esta energía total comprende radiaciones infrarrojas y ultravioletas que son invisibles, por lo que carecen de interés en relación con la iluminación. El físico Planck demostró que la distribución de la energía en la radiación por incandescencia no era uniforme. La curva que la representa, en función de la longitud de onda, tiene un máximo; es decir, que a una temperatura dada T, un cuerpo irradia principalmente radiaciones de longitud de onda determinada λ_m. La temperatura T y la longitud de onda λ_m que corresponde al máximo de energía están ligadas por la relación $T \cdot \lambda_m =$ = constante *(ley de Wien)*. Así, cuanto más elevada sea la temperatura más pequeña será la longitud de onda λ_m. Esto explica por qué un cuerpo está rojo a 500°, rojo claro a 800°, amarillo a 1 000° y blanco a 1 500 grados, y que ciertas estrellas muy cálidas parezcan azules.

Prácticamente, esto se explica por el hecho de que, en igualdad de las restantes condiciones, un cuerpo incandescente emitirá tanta más energía en forma de radiaciones visibles cuanto más caliente esté; convendrá, pues, para los fines de alumbrado, conseguir fuentes a altas temperaturas. Pero la naturaleza del cuerpo que se calienta también interviene, ya que un cuerpo muy absorbente irradia más que un cuerpo reflector. Los cuerpos muy absorbentes son los que parecen negros a la temperatura ordinaria: un pedazo de carbón calentado alumbrará más que un bloque de cal a la misma temperatura. La mayoría de los gases, el aire en particular, son muy poco absorbentes; sería, pues, poco interesante calentar el aire para obtener una fuente de alumbrado.

De estas leyes de la irradiación por incandescencia se deducen las siguientes consecuencias prácticas: para obtener el rendimiento óptimo hay que elevar a la mayor temperatura posible cuerpos muy absorbentes. Este calentamiento puede obtenerse por combustión o eléctricamente, con lo que tendremos dos tipos de lámpara de incandescencia: las lámparas de combustión y las eléctricas.

Lámparas de combustión. — La iluminación se obtuvo primeramente con llamas, producidas por combustión, cuya luz es proporcionada por las partículas muy pequeñas de carbono que contiene el combustible, que han alcanzado una elevada temperatura antes de quemarse. Como combustibles se han utilizado sucesivamente materias grasas y ceras (cirios, bujías), petróleo, gas (mecheros de gas y mecheros de acetileno). Las lámparas de combustión ya no se utilizan apenas, salvo en caso de necesidad (fallo de otros sistemas).

Cirios, velas, bujías. — Rodeando de una materia grasa adecuada una mecha, la cual permite que el combustible liquidado ascienda, por capilaridad, hacia la llama, se obtienen: con cera, los cirios; con sebo, las velas, y con estearina o parafina, las bujías. Los cirios y las velas se fabrican moldeándolos simplemente en formas metálicas que tienen un estrechamiento por su parte inferior para formar la punta, y que están ligeramente ensanchadas por su parte superior para facilitar la operación. La mecha está suspendida en el interior del molde, en el cual se vierte el sebo muy líquido, que después se solidifica por enfriamiento.

Las bujías se fabrican con una máquina de moldes, que se compone de dos cajas superpuestas: la de arriba, de chapa, es la que lleva los moldes y puede calentarse por medio de vapor o enfriarse mediante una corriente de aire frío; la de abajo lleva las bobinas, a las que van arrolladas las mechas. A cada molde corresponde una bobina, y cada mecha se fija en el molde correspondiente, atravesándolo de parte a parte. Se funde después la estearina que se vierte en la caja de la parte superior, y la mezcla pasa a cada molde, calentado por vapor. Se envía entonces una corriente de aire frío, que solidifica la estearina, la cual, finalmente, es extraída del molde.

Lámparas de combustibles líquidos. — La lámpara de petróleo, en la que el combustible asciende a la mecha por capilaridad, es harto conocida para que haya necesidad de describirla. En algunos faros todavía se utilizan, pero con el petróleo en forma de vapor, exactamente como el gas de alumbrado en los mecheros Auer.

Lámparas de acetileno. — **Berthelot** señaló ya, en 1862, el poder de iluminación del acetileno, quince veces mayor que el del gas de hulla. Su utilización para el alumbrado sólo fue, sin embargo, posible a partir de 1895, cuando se supo fabricar industrialmente el carburo de calcio en horno eléctrico, según el procedimiento Moissant.

La lámpara de acetileno tiene un depósito con carburo de calcio, sobre el que se vierte agua, cuyo flujo está regulado por la presión del gas producido. En otros casos, el aparato de alumbrado está alimentado con acetileno disuelto, que se obtiene comprimiendo el acetileno ordinario a una presión de 10 kg en recipientes que contienen materias porosas impregnadas de acetona. Todavía existen faros que utilizan acetileno como fuente de alumbrado, pero tienden a desaparecer, ya que se prefiere utilizar para la misma finalidad el propano, que es más cómodo de almacenar.

Alumbrado de gas. — **Lebón** (1769-1804) descubrió, en 1786, el gas de alumbrado, que se aplicó en las fábricas inglesas (1805). En Francia fue **Winser** quien introdujo este tipo de alumbrado, en 1817. A causa de las ventajas que presentaba, adquirió rápido desarrollo, pero su técnica permaneció sin progresar durante más de 60 años. Los primeros mecheros de gas eran de dos tipos: el mechero llamado de *mariposa*, y el llamado "*Bengel*", que se distinguían en la forma de la llama. Éste derivaba del mechero de corriente de aire central de **Argand** (1755-1803), y su funcionamiento requería una chimenea de vidrio de costoso mantenimiento, lo que limitó su empleo.

El mechero de "*mariposa*", que se utilizaba tanto para el interior como para el exterior, estaba formado de un botón esférico hueco, de metal o de esteatita, perforado por una rendija regular, por la cual salía el gas. La importancia del mechero variaba según la anchura de esta rendija, que se calibraba en décimas de milímetro. La dimensión más corriente era la de 0,7 milímetros, que correspondía a un caudal de 140 litros de gas por hora, bajo una presión de 3 mm de agua; la intensidad luminosa proporcionada por este mechero era de aproximadamente 11 bujías.

Para el alumbrado público se construyeron aparatos compuestos de seis mecheros, con una intensidad de 140 bujías.

Hacia 1881 apareció el *mechero de recuperación Siemens*: el aire penetraba en él de abajo arriba, y los productos de la combustión seguían un trayecto descendente; de esta forma, el aire se calentaba antes de quemarse. Pronto se encontró un sistema más racional, en el que los productos calientes de la combustión se elevaban naturalmente, penetrando el aire fresco de arriba abajo; se consiguieron así mecheros con intensidades de 50 a 300 bujías, pero de mantenimiento bastante costoso.

El alumbrado de gas parecía destinado a desaparecer, ante la competencia de la lámpara eléctrica, cuando se tuvo la idea de utilizar el poder calorífico de la llama de gas para poner incandescente una substancia auxiliar. El primer mechero de este tipo fue el de **Clamond** (1882), que utilizaba un quemador Bunsen para obtener una temperatura de llama lo más alta y potente posible; esta llama ponía incandescente un cestillo cónico de magnesio, que cubría el quemador. Este mechero funcionaba bien sólo durante algunas horas.

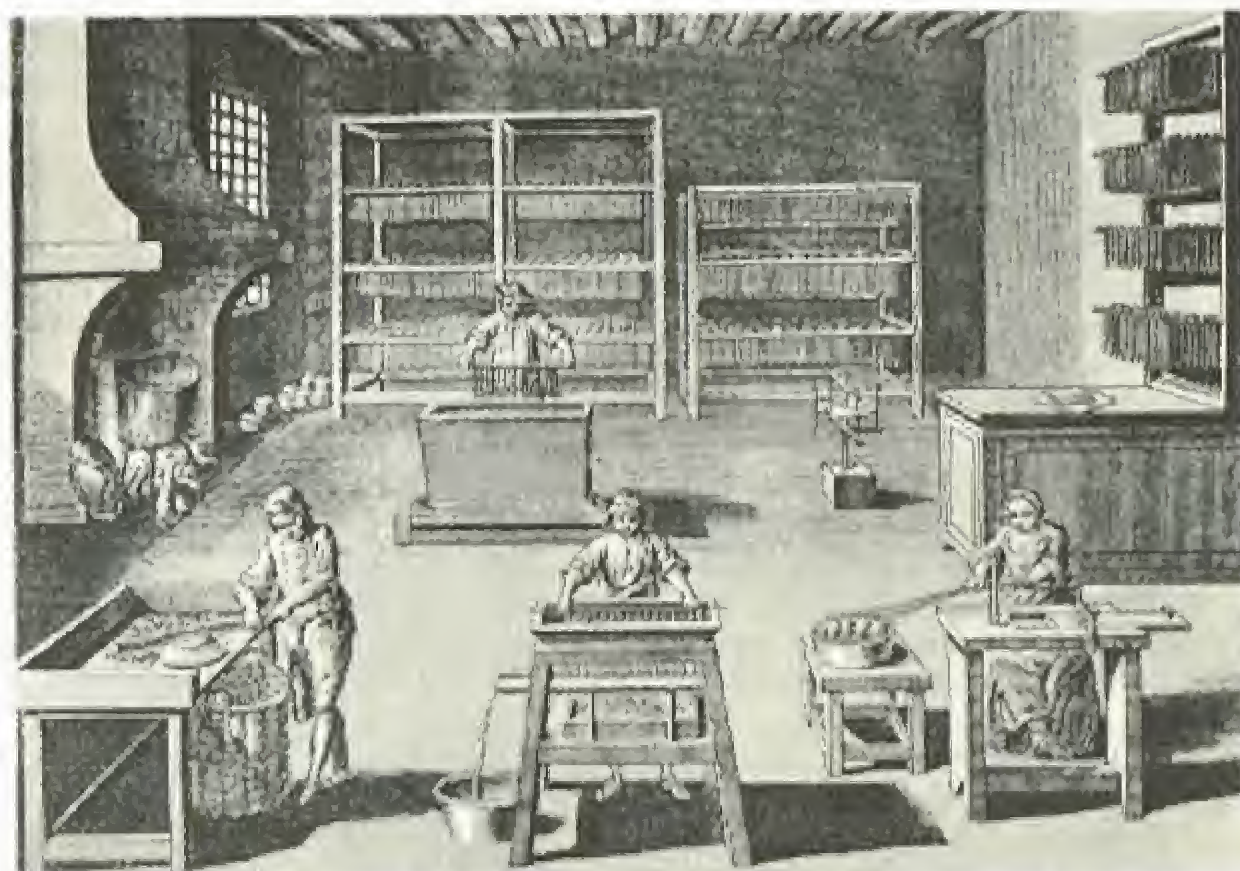
Apareció después el *manguito Auer*, así denominado en honor de su inventor, **Auer von Welsbach** (1858-1929). Es una especie de armazón muy ligera, que se obtiene incinerando un tejido de punto previamente impregnado con sales de metales raros. En 1885, el manguito era a base de lantano, y en 1892, una mezcla de 99% de óxido de torio y un 1% de óxido de cerio; la intensidad luminosa del nuevo mechero era ocho veces mayor que la del de mariposa.

Su mayor rendimiento se debe a una mejor combustión del gas, que eleva la temperatura, y también a que los óxidos de torio y de cerio que se depositan en el manguito no obedecen a la ley de Planck, sino que su radiación se desplaza hacia las cortas longitudes de onda.

A su vez, la calidad de los manguitos fue también perfeccionada fabricándolos de seda artificial. El descubrimiento de yacimientos de tierras raras les hizo bajar de precio. En 1902 se creó el mechero invertido, con manguito de forma semiesférica suspendido a la parte inferior del quemador, y con la llama dirigida hacia abajo; el rendimiento luminoso aumentó, pero la regulación era más difícil que con el mechero recto y su funcionamiento menos regular, ya que se forzaba al gas, más ligero que el aire, a que siguiera un trayecto descendente.

El mechero múltiple invertido de inyector recto reúne las ventajas de ambos mecheros: el recto y el invertido. El aparato tiene forma de hongo, siendo su tallo el tubo de mezcla de un quemador Bunsen y soportando la cabeza, en su parte inferior, un número variable de manguitos invertidos.

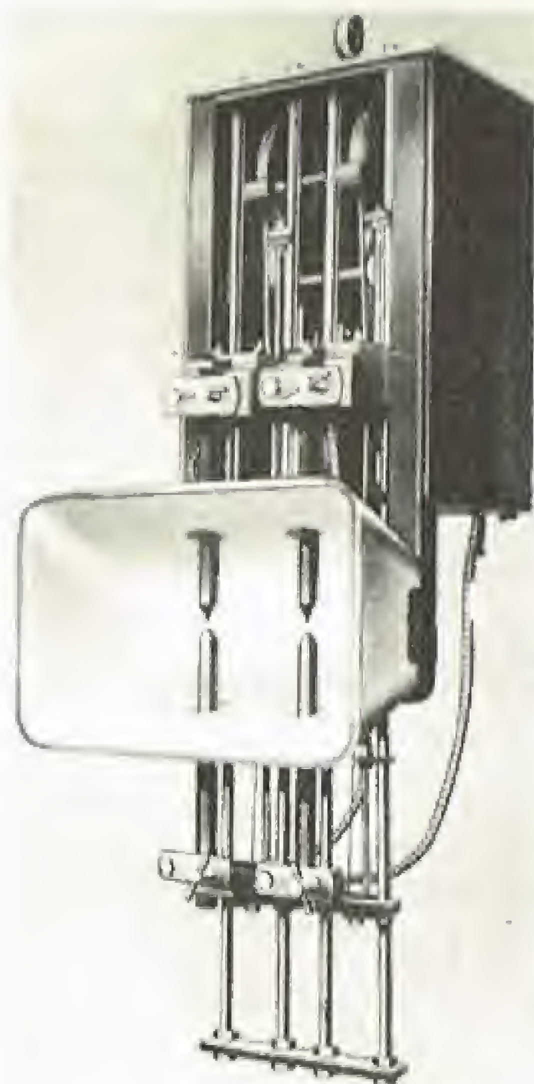
Con la utilización del gas comprimido se ha aumentado la intensidad de los focos. Haciendo que la presión del gas sea la de dos metros de agua, se han construido focos de 4 000 bujías, con un excelente rendimiento: 0,7 litros de gas por bujía-hora. Estas lámparas de gas son las que todavía se utilizan para el alumbrado intensivo de las vías públicas de algunas grandes ciudades.



Fabricación de velas (Descripción de las artes y oficios de la Real Academia de Ciencias de Francia [1760-1780]) [*Doc. Larousse*]

Alumbrado eléctrico por incandescencia. — En este tipo de alumbrado, el calentamiento se obtiene ya por el efecto Joule en una resistencia (lámparas eléctricas), ya por un arco que salta en el aire, entre dos electrodos: lámparas de arco. En estas últimas, la radiación es debida principalmente a la incandescencia del cráter, que alcanza una elevada temperatura, pero también se producen fenómenos de luminiscencia.

Lámparas de arco. — Si se toman dos conductores de carbones colocados horizontalmente, unidos respectivamente a los bornes de una



Lámpara de arco

fuente de tensión suficiente, se produce, ya se mantengan en contacto, ya se les separe, una faja luminosa entre ambos carbones que, a causa de la convección del aire caliente, toma la forma de un arco; este arco emite luz, tanto por la incandescencia de los carbones como por la luminiscencia de la parte gaseosa del arco.

Las primeras lámparas de arco con electrodos de carbono presentaban el inconveniente de que sus carbones se gastaban rápidamente. El arco se formaba entre dos electrodos situados uno al lado de otro, como en la bujía Jablochkoff, o bien uniendo sus extremidades, como en las lámparas de arco propiamente dichas.

El arco en cámara aislada permite aumentar de ocho a cien horas la duración de los carbones, pero en perjuicio del rendimiento luminoso.

Para aumentar la cantidad de luz emitida por el arco se añadieron al carbono de los electrodos sales metálicas de calcio, cerio, tungsteno, etc., formándose así las *lámparas de arco-llama* de **Blondel** (1863-1938), cuya intensidad luminosa es de cinco a seis veces mayor que la de los arcos con electrodos de carbono puro.

La lámpara Bardon, de arco-llama en recipiente cerrado, permite obtener intensidades luminosas de 1 750 y 3 200 bujías, con un consumo de 0,25 vatio-hora por bujía.

Por último, pueden citarse los *arcos metálicos*, que funcionan entre aleaciones: óxido de hierro magnético mezclado con titanio, u óxido de titanio.

Las lámparas de arco se utilizan todavía para las tomas de vistas cinematográficas, para la proyección de películas de pequeño tamaño, que necesitan una iluminación potente, y para los faros de la navegación marítima. El faro de Créach, en la isla de Ouessant, está equipado con un arco de 500 amperios a una tensión de 85 voltios; estas lámparas, no obstante, se utilizan cada vez menos, incluso para los faros.

Lámpara Nernst

Lámparas de incandescencia. — **Edison** (1847-1931) construyó en 1880 la primera lámpara eléctrica de incandescencia. Ya en 1878 se hizo en París, en la avenida de la Ópera, un primer intento de alumbrado eléctrico, utilizando bujías Jablochkoff.

La lámpara de Edison fue perfeccionada substituyendo la fibra de bambú utilizada primitivamente por un filamento más sólido, que llevaba un núcleo de celulosa calcinada sobre la cual se había depositado una capa de grafito, obtenido por cocción al horno eléctrico en una atmósfera de hidrocarburos; su rendimiento era pequeño y el consumo pasaba de 3,5 vatios-hora por bujía.

En 1898, **Nernst** (1864-1941) consiguió poner incandescente un bastoncillo de óxidos de metales raros: había que calentarlo previamente hasta 600°, temperatura a la cual se hacía conductor; para ello se hacía pasar por una espiral metálica una corriente eléctrica, que se interrumpía automáticamente una vez cebada, complicación perjudicial. Las lámparas Nernst, que tenían intensidades luminosas de 25 a 500 bujías, no consumían más que 2,5 vatios-hora por bujía.

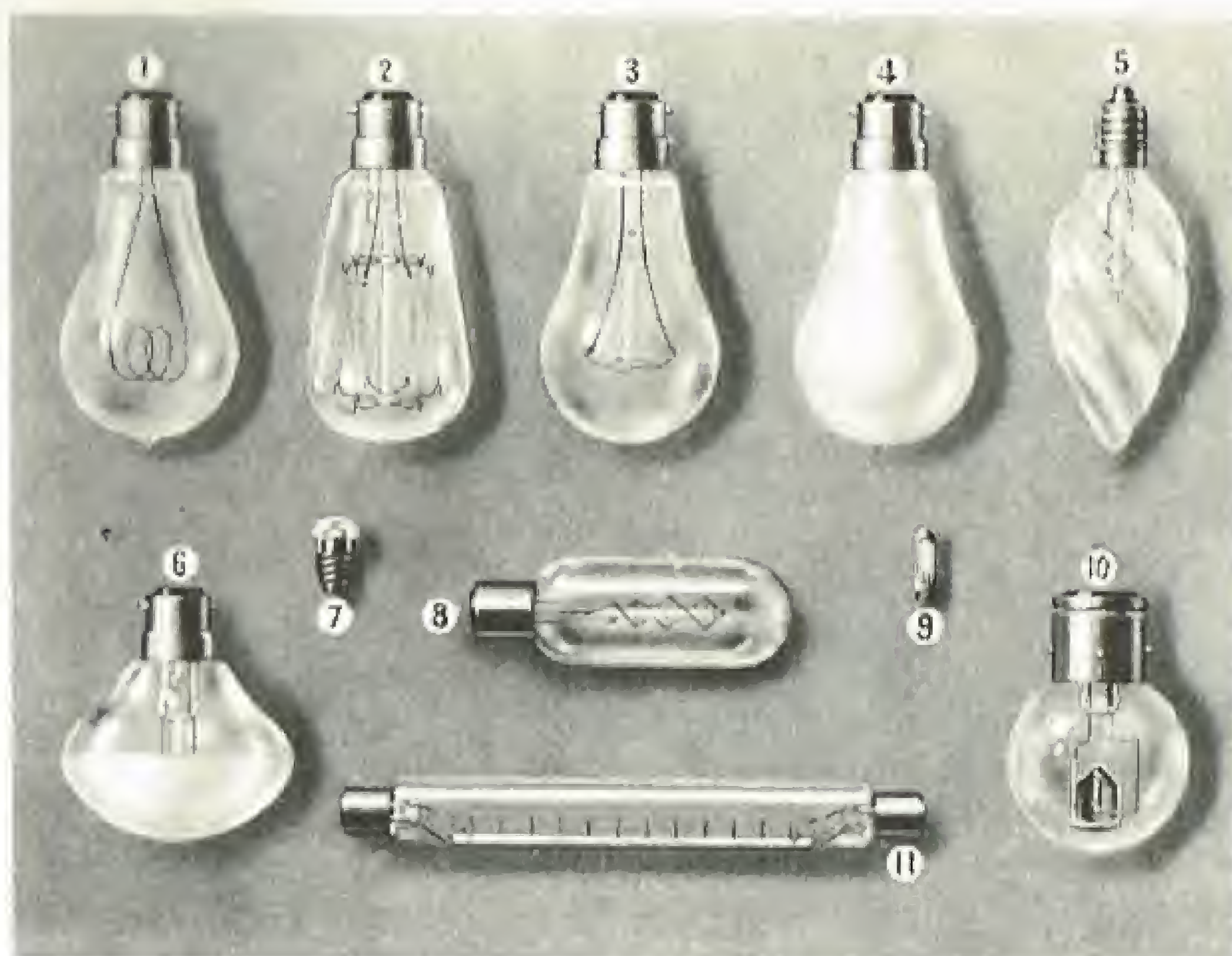
El filamento metálico de osmio data de 1900-1904; después apareció el de tántalo y, finalmente, el de tungsteno. El filamento de tungsteno consumía sólo el 85% de la potencia que absorbía el de carbono, y su poder de iluminación era 2,75 veces mayor, pero si no se conseguía un vacío absoluto en el interior de la bombilla, y quedaba un simple resto de agua, el tungsteno se evaporaba y ennegrecía las paredes de la lámpara.

Langmuir (nacido en 1881) ideó, en 1910, llenar las bombillas con un gas inerte, mezcla de nitrógeno y argón, y arrollar después el filamento en forma de hélice, con las espiras muy juntas, a fin de reducir las pérdidas de energía debidas al intercambio calorífico entre el filamento incandescente y el gas inerte.

Las lámparas de *atmósfera gaseosa* permiten obtener fuentes de gran potencia, hasta de 6 000 vatios, con una intensidad luminosa de más de 10 000 bujías.

La lámpara de filamento celulósico de Edison consumía 3 vatios-hora por bujía; las ampollas de medio vatio, de atmósfera de argón, sólo consumen, en la actualidad, 0,5 vatios-hora por bujía.

En 1934, **Georges Claude** preconizó el empleo de criptón y xenón en lugar de argón. **André Claude,** primo suyo, construyó en mayo de 1935 la lámpara de atmósfera de criptón y xenón. El resultado más económico se obtiene con una asociación de 5 a 20 volúmenes de criptón con 100 de xenón. A causa de la débil conductibilidad del criptón y el xenón, ha podido reducirse en un 60 por 100 el volumen de estas lámparas sin disminuir su resistencia mecánica ni su intensidad luminosa.



1. Lámpara de filamento de carbono; 2. Lámpara de vacío con filamento de tungsteno en zigzag, mantenido por ganchos montados en forma de estrella sobre bastoncillo de vidrio; 3. Lámpara de atmósfera gaseosa y filamento en espiral; 4. Lámpara de interior deslustrada, serie «standard»; 5. Lámpara con casquillo de rosca; 6. Lámpara de forma de cebolla, semideslustrada; 7. Lámpara para linterna de bolsillo; 8. Lámpara tubular; 9. Lámpara para usos médicos, que se fija en la extremidad de las sondas de exploración; 10. Lámpara para faros de automóvil, llamada de cruce; 11. Lámpara tubular con dos casquillos, para el alumbrado de escaparates e iluminaciones decorativas

Debe señalarse que el rendimiento de las lámparas de filamento está limitado por la temperatura máxima que puede soportar dicho filamento, que para el tungsteno es de 3 000° C.

Alumbrado por luminiscencia

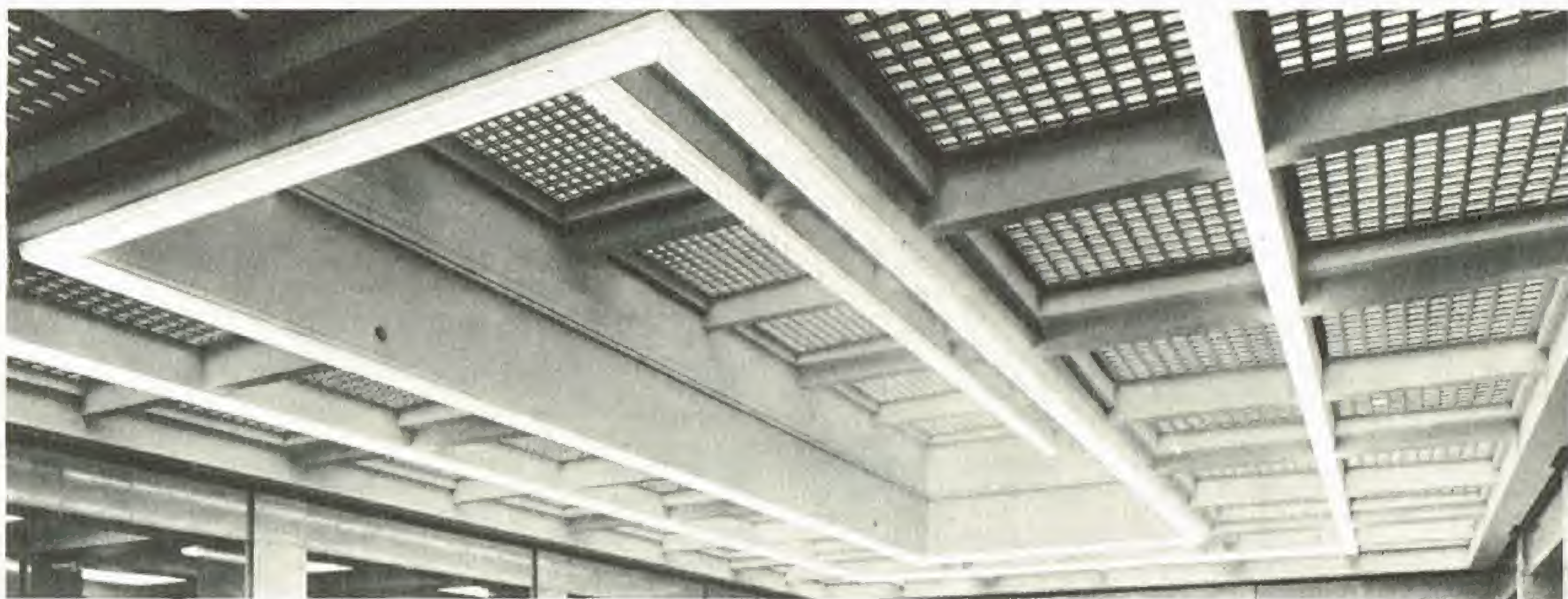
Generalidades. — El principio del alumbrado por luminiscencia es completamente diferente del de incandescencia, y no obedece a las mismas leyes. La luminiscencia se obtiene al bombardear átomos con electrones muy veloces. El átomo se pone, a causa del choque, en un estado de excitación inestable, y su vuelta al estado normal se manifiesta por una emisión de radiaciones cuya longitud de onda sólo depende de la naturaleza del átomo. El máximo de intensidad luminosa puede situarse en cualquier parte del espectro, aunque generalmente se encuentra en la región ultravioleta, al contrario de lo que ocurre con el alumbrado por incandescencia, donde el máximo de energía se sitúa, a causa de las débiles temperaturas que sabemos obtener, en la región del infrarrojo.

Para conseguir una rápida corriente de electrones, se utiliza ya la descarga eléctrica en gases rarificados (los electrones son arrancados entonces del cátodo por la gran intensidad del campo eléctrico que existe entre los electrodos), ya una emisión termoiónica a baja o alta temperatura, estando acelerados los electrones por una diferencia de potencial relativamente pequeña (v. TEORÍAS MODERNAS, p. 153). Tendremos, pues, dos modos de alumbrado por luminiscencia: la descarga luminiscente de alta tensión y la descarga de baja tensión o en régimen de arco.

Tubos luminiscentes de alta tensión. — Estos tubos, utilizados en gran escala para la publicidad, son *tubos Geissler*. Las tensiones utilizadas son del orden de 700 voltios por metro, para un tubo de 15 milímetros de diámetro. La presión en el interior es de algunos milímetros de mercurio, y su luz varía según el gas rarificado que contengan: roja con el neón, anaranjada con el nitrógeno, azulada con el mercurio. En este último caso, el tubo contiene a la vez neón y mercurio.

El consumo de energía eléctrica de estos tubos es muy pequeño; la intensidad de la corriente no excede de unos cuantos miliamperios. Su rendimiento es excelente, pero no se prestan al alumbrado interior a causa del color de su luz. Por otra parte, la energía radiada tiene su máximo en la región ultravioleta.

Lámparas con régimen de arco. — La emisión de electrones se produce por calentamiento del cátodo, a altas temperaturas o bien, lo más corriente, a baja temperatura, con cátodos especiales. La primera de estas lámparas fue la de vapor de mercurio, inventada por el físico americano Cooper Hewit (1861-1921). Estaba compuesta de un electrodo positivo de platino, hierro, níquel o mercurio, y de un electrodo negativo de mercurio. Al cebarla para que empezara a funcionar, el mercurio se volatilizaba muy rápidamente en una dilatación del tubo y se observaba la formación de un fuego fatuo que partía del cátodo, en la base del arco luminoso.



Alumbrado fluorescente del techo del Banco de Francia (*Doc. Claude, Paz y Silva*) [*Fot. Racroul*]

En la actualidad, las lámparas de vapor de mercurio son de cuarzo si se quieren utilizar las radiaciones ultravioleta intensas que emiten y que absorbe el vidrio, o bien de vidrio muy resistente. El encendido o el cebado se hace provocando un cortocircuito, o por oscilación, uniendo los electrodos con un hilo de mercurio: cuando se rompe el hilo, salta la chispa de cebado. El cadmio puro mezclado con mercurio en proporción del 3 a 10%, da una luz muy blanca y muy intensa.

La lámpara de vapor de mercurio sólo es útil para los fuertes alumbrados, con focos de 600 a 3 000 ó 4 000 bujías: exposiciones, monumentos, paseos. Esta luz permite también tomar buenas vistas fotográficas y cinematográficas.

Basándose en el mismo principio, se han construido lámparas de vapor de sodio que dan una luz amarilla. Como el ojo tiene su máxima agudeza visual con este color, las lámparas de vapor de sodio se utilizan para el alumbrado de las carreteras; también existen lámparas de vapor de cadmio —luz blanca—, de talio y de litio.

Tubos fluorescentes. — Como, según se ha dicho, el máximo de energía irradiada por las lámparas de descarga luminiscente se sitúa en la región ultravioleta, se ha procurado por diversos medios trasponer este máximo a la región visible, para lo cual se han construido lámparas de vapor de mercurio que funcionan a presiones muy elevadas; pero la solución que ha dado lugar a aplicaciones prácticas es la de los tubos fluorescentes. Estos tubos son de régimen de arco, en cuyo interior se ha depositado una delgada película de substancia fluorescente que, bajo la acción de la radiación ultravioleta de la descarga, emite una luz visible. Se llega a obtener una luz que parece blanca utilizando mezclas de substancias fluorescentes: la energía radiada bajo forma de ultravioleta se transforma, pues, en luz visible, con un color aceptable para la iluminación interior.

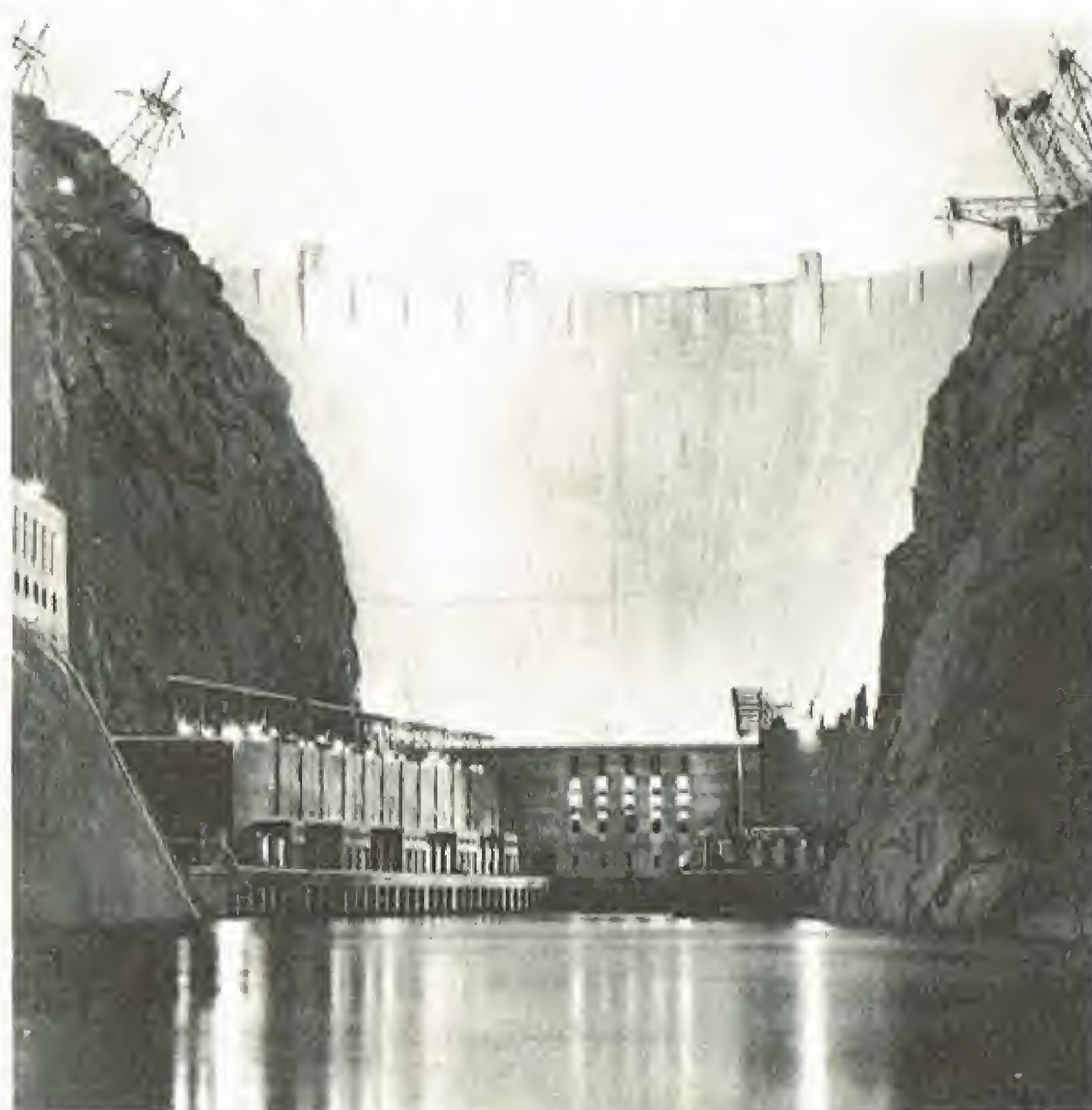
Para cebar el arco se utilizan diversos dispositivos denominados "arranques". Los más corrientes consisten en un circuito de calentamiento del cátodo, que se interrumpe una vez formado el arco. Se presenta así un pequeño inconveniente: el encendido no es instantáneo, sino que se produce sólo al cabo del tiempo necesario para que el cátodo alcance la temperatura deseada. No obstante, se ha llegado recientemente a fabricar cátodos que emiten electrones en frío y que permiten un encendido casi instantáneo.

Los tubos fluorescentes, perfeccionados hace más de veinte años, representan la solución más económica para el alumbrado interior, ya que al elevado rendimiento de los tubos de descarga añaden una recuperación de la energía emitida bajo forma de radiación ultravioleta. Cabe, además, esperar que se produzcan nuevos perfeccionamientos.

La producción de energía

Generalidades. — La principal fuente de energía exterior utilizada por el hombre ha sido, durante mucho tiempo, la de los animales de tiro, a la que se añadió después la utilización del viento para la navegación y los molinos, así como la captación de los saltos de agua para accionar diversos mecanismos. El descubrimiento de la máquina de vapor fue el primer paso hacia una producción importante de energía. En la actualidad puede medirse el grado de civilización de una población por la cantidad de energía de que dispone por habitante; así, el inventario de las fuentes de energía, y el estudio de los medios propios para utilizarlas, son también problemas de una importancia práctica considerable.

Las fuentes de energía y los principios de su utilización. — La principal fuente son los combustibles (v. Aplicaciones de la Química, p. 342), cuyo calor de combustión es transformado en trabajo por los motores. Viene después la energía hidráulica, es decir, la que producen los saltos de agua, que ya no se utiliza directamente como en otras épocas, sino que es transformada en energía eléctrica por medio de turbinas. También existen gigantescas fuentes de energía que no sabemos utilizar prácticamente o que ofrecen dificultades prácticas de explotación: son la energía solar, que representa 1 kW por metro cuadrado soleado, la energía de los vientos o eólica, la energía de las olas, la de las mareas, la debida a las diferencias de temperatura entre el fondo y la superficie de los mares, o entre el interior de la Tierra y su superficie, y por último, la más reciente, aunque no la menor, la energía llamada atómica, debida a la desintegración de los núcleos atómicos.



La energía hidráulica: Embalse Boulder Dam, en los Estados Unidos de América (*Fot. Union Pacific Railboard*)

Se realizan actualmente estudios y ensayos para utilizar la energía solar, la energía térmica de los mares y del suelo, la de las mareas y la energía nuclear. En diferentes puntos de la Tierra funcionan pequeñas instalaciones que captan la energía eólica, pero la producción reunida de todas estas fuentes no presenta, en el momento actual, ninguna importancia práctica, ya que sólo alcanza una fracción infinitesimal de la que proporcionan los combustibles y los saltos de agua; lo que no quiere decir, ni mucho menos, que así haya de suceder siempre en el futuro.

Los principios actuales de producción de energía son: la transformación en trabajo del calor de combustión de los combustibles y la utilización de la energía cinética de las caídas de los saltos de agua, lo que se consigue con los motores térmicos y las turbinas hidráulicas, respectivamente.

Los motores térmicos utilizan la fuerza de expansión de un fluido que ha adquirido, al calentarse, una

presión elevada, y se dividen en tres grandes clases: motores de émbolo en los cuales la presión del fluido actúa sobre un pistón, al que comunica un movimiento de vaivén que se transforma en movimiento giratorio por un mecanismo de biela y manivela; los motores de turbina, en los cuales la energía cinética del fluido actúa sobre los álabes de una rueda para hacerla girar y, finalmente, los reactores, en los cuales el fluido expulsado a gran velocidad comunica un empuje en sentido inverso al de su movimiento.

Motores de émbolo

Máquina de vapor. Máquinas compuestas. Motores de combustión interna. Motores de gas. Motores de gasolina. Carburación. Doble alimentación. Bomba de aceleración. Encendido. Refrigeración. Engrase. Estado actual del motor de gasolina: su rendimiento. Motor Diesel. Motores semi-Diesel. Ventajas del motor Diesel

Comprenden los motores de vapor, en los cuales el fluido motor es vapor de agua (también se ha utilizado el vapor de mercurio) producido en una caldera, y los motores de combustión interna, en los que el fluido motor es aire a temperatura elevada; esta temperatura se alcanza inflamando una mezcla combustible en el interior del cilindro donde se mueve el pistón.

Máquina de vapor. — La máquina de vapor actual, cuyo principio se ha expuesto en Termología (p. 58), tiene las mismas características esenciales que las máquinas de 1880: utilización de la expansión en uno o varios cilindros, regulación de la potencia por el regulador que determina el grado de expansión, y empleo de la envoltura y del recalentamiento.

El principio de las máquinas de émbolo es el mismo de la **máquina de Watt:** a causa de la diferencia de presión entre la caldera y el condensador, un émbolo se desplaza dentro de un cilindro, y éste desplazamiento produce trabajo. Esos dos órganos se ponen en comunicación, respectiva y alternativamente, con cada una de las caras del émbolo, durante una parte de su trayectoria, gracias al mecanismo de distribución que regula la abertura de los órganos de admisión y de escape. El movimiento alternativo del émbolo se transmite directamente al árbol, convertido en movimiento de rotación por un mecanismo de biela y manivela; la biela está articulada a una extremidad de la barra del émbolo o pistón y la manivela al árbol.

Las máquinas se denominan horizontales o verticales, según la dirección del eje del cilindro; las verticales se adaptan mejor a las grandes velocidades de rotación (generatrices eléctricas, máquinas marinas).

Según los órganos que obturan los orificios de paso del vapor, se tienen máquinas de válvulas, de distribuidores, de obturadores o de émbolos-válvulas.

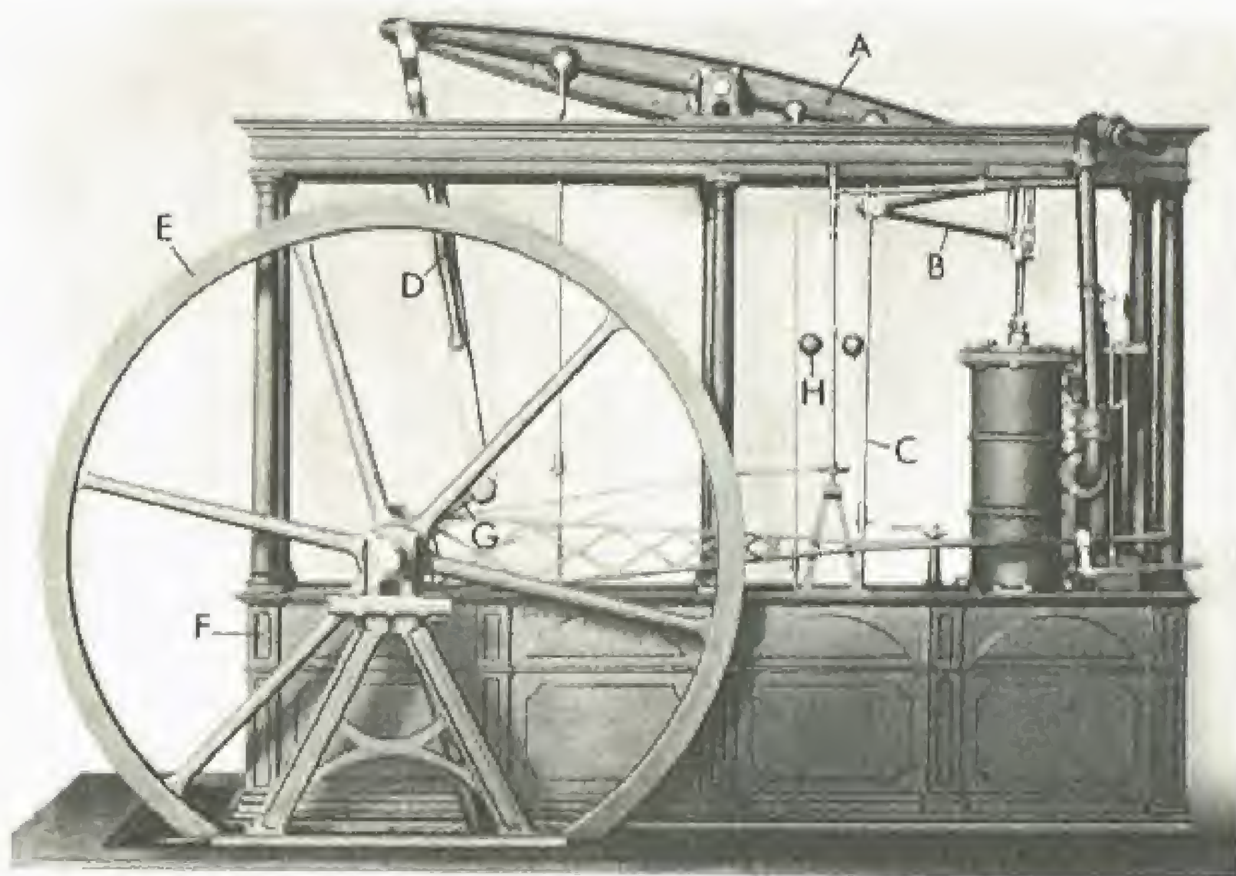
La *válvula*, que fue utilizada por Watt en la forma rudimentaria de etapa simple, se renovó a partir de 1865.

El distribuidor plano, inventado por **Murray,** se utiliza ya en su forma sencilla, ya en forma de dos distribuidores superpuestos **(Meyer,** 1842). El distribuidor plano se adapta a las velocidades elevadas, pero solamente a presiones y sobrecalentamientos débiles; si las presiones son elevadas, se recurre al distribuidor cilíndrico.

El *obturador* de **Corliss** es de tipo rotatorio; los obturadores de admisión y de escape son diferentes.

El *pistón-válvula* (1898) funciona con un engrase reducido y permite, como la válvula, el empleo de vapor sobrecalentado. Los obturadores son manguitos cilíndricos provistos de segmentos rigurosamente equilibrados con respecto a las presiones.

El vapor es admitido en el cilindro *(admisión plena)* durante todo el recorrido, o bien durante una fracción del mismo, a la presión de la caldera; en estos casos, como el orificio de admisión está cerrado, el vapor se expande gradualmente, comprime el émbolo y alcanza, al final de la trayectoria, la presión del condensador *(máquinas de expansión);* estas máquinas son las más económicas (V. lámina fuera de texto).

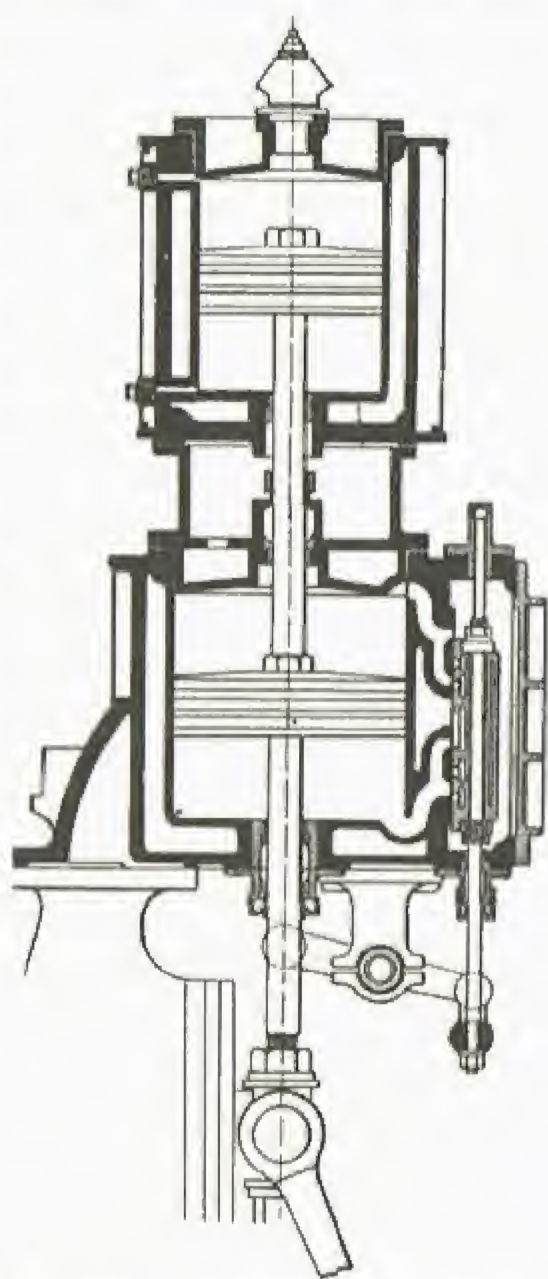


Máquina de Watt (A, balancín; B, paralelogramo; C, varilla de la bomba de aire; D, biela; E, volante; F, zócalo; G, manivela; H, regulador de bolas) [*Fot. Boyer*]

Máquinas compuestas. — Para que el vapor pueda ceder toda su energía potencial, resulta ventajoso hacerle actuar sucesivamente en dos o tres cilindros de diámetros crecientes, obteniéndose así una expansión fraccionada: la expansión es doble o triple.

Cuando los dos cilindros están uno al lado del otro, las máquinas son *cross compound;* pero si los ejes están confundidos y los cilindros colocados uno detrás del otro, con los pistones unidos por una varilla, las máquinas se llaman *tandem-compound (fig. 603).*

La máquina de vapor de movimiento alterno está en franca decadencia, a causa de las ventajas que presentan las turbinas de vapor y los motores Diesel; continúa, no obstante, empleándose, principalmente en las locomotoras y para la producción de energía en las fábricas que utilizan para la calefacción el vapor a baja presión del escape.


Fig. 603.—Máquina «tandem-compound»

Motores de combustión interna. — También se les llama motores de explosión, aunque lo que en realidad se procura en ellos es, por el contrario, que la mezcla combustible de dentro del cilindro no alcance el punto de explosión, lo que sería muy perjudicial a su buen funcionamiento.

El principio de los motores de combustión interna fue descrito en el capítulo Termología (p. 59). Como allí se explicó, el cigüeñal daba dos vueltas durante el ciclo completo, y solamente recibía la energía mecánica del motor durante media vuelta: esta energía mecánica es acumulada por un *volante*, inserto en el cigüeñal, cuya misión es asegurar al motor un funcionamiento regular durante los tres tiempos en que absorbe energía.

En la práctica se utilizan frecuentemente motores de varios cilindros n, de forma que se tenga, en vez de una explosión por dos vueltas del cigüeñal, $\frac{n}{2}$ explosiones por cada vuelta.

El motor de cuatro cilindros tiene dos explosiones por vuelta, y uno de los recorridos de los cuatro pistones es siempre motor.

En un motor de seis cilindros se produce una explosión cada 120 grados; por consiguiente, hay siempre un esfuerzo motor, cualquiera que sea la posición del árbol-manivela.

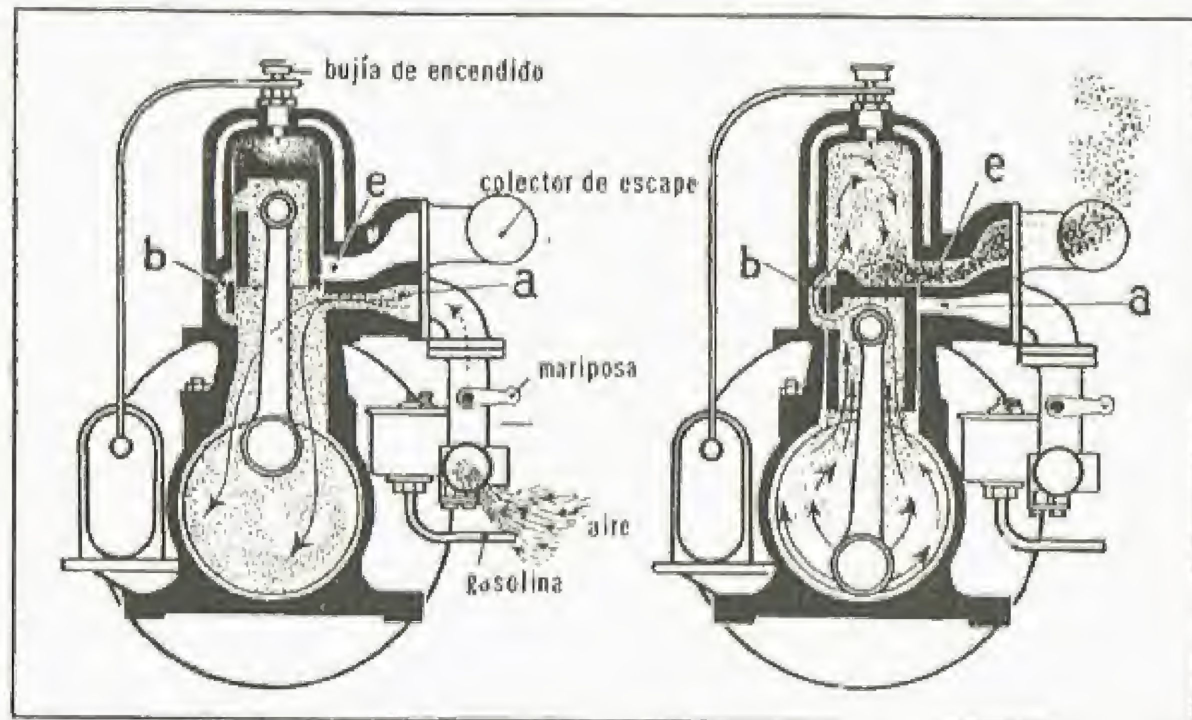


Fig. 604.—Motor de dos tiempos

En los motores de ocho cilindros, se produce una explosión a cada 90 grados (v. lámina *Energía*).

También hay motores de dos tiempos; en este ciclo se siguen pro-

duciendo las cuatro fases del ciclo de cuatro tiempos, pero mientras que en este último todas las fases se producen al mismo lado del émbolo, en el de dos tiempos se produce en el cárter estanco, bajo el émbolo, una aspiración y una compresión preparatorias de la mezcla gaseosa; por consiguiente, los cuatro tiempos se realizan en una sola vuelta del cigüeñal.

Los motores de dos tiempos no están provistos de válvulas, siendo el propio émbolo el que asegura la distribución, al dejar al descubierto, en tiempo útil, orificios en las paredes del cilindro: orificio de admisión y orificio de escape.

1.º *Ascenso del émbolo* (v. *fig.* 604, a la izquierda). Como en el motor de cuatro tiempos, el motor comprime por encima de él mismo, en el cilindro propiamente dicho, la mezcla gaseosa, pero, además, su parte inferior descubre el orificio *a*, haciendo que el tubo de admisión comunique con el cárter, en el cual el émbolo ha producido, al ascender, una depresión; por consiguiente, el cárter se llena de mezcla carburante;

2.º *Descenso del émbolo* (v. *fig.* 604, a la derecha). Los gases se han inflamado cuando el émbolo estaba en el punto muerto superior; se expanden hasta el momento en que el émbolo que ha cerrado la admisión *a* deja al descubierto los orificios *b*, que ponen en relación el cilindro propiamente dicho con el cárter, donde los gases han sido comprimidos por el descenso del émbolo; bajo el efecto de esta compresión, los gases pasan al cilindro y acaban de expulsar del mismo los gases quemados por el orificio *e*, que ha quedado también al descubierto un poco antes que *b*.

Motores de gas. — Se designan en general con este nombre los motores de combustión interna en los que el combustible es un gas de escaso poder calorífico (1 000 a 1 200 calorías por m³), ya que los que emplean gases de gran poder calorífico (metano, gas de agua) son idénticos a los motores de gasolina, que se describirán más adelante. Los motores de gas son aparatos muy pesados y de gran solidez, que giran a poca velocidad; se utilizan sobre todo para producir energía eléctrica cuando se dispone de gas como subproducto (altos hornos).

Motores de gasolina. — Aunque los motores de gasolina pueden utilizar otros combustibles, como alcohol, benzol o gases ricos, continuamos designándolos por este nombre porque, en realidad, todos los motores actuales de este tipo se han concebido y estudiado para consumir gasolina, y si emplean otro combustible es sólo accidentalmente. No describiremos de nuevo estos motores, que ya se han estudiado en otro lugar (v. p. 59), y sólo daremos algunos detalles sobre los aparatos anejos y, en particular, sobre el carburador, que tiene como función alimentar el motor con una mezcla combustible variable, adaptada al esfuerzo que se solicite a la máquina.

Carburación. — La mezcla detonante ideal es aquella en que, después de la combustión, los gases quemados sólo estén compuestos de nitrógeno, gas carbónico y vapor de agua. La mezcla carburada perfecta corresponde a una proporción de 15,3 g de aire por 1 g de gasolina. En el carburador es donde queda preparada la mezcla carburante.

Los diferentes tipos de carburadores son de salpicador, de pulverizador o de inyector.

Consideremos un carburador de inyector como el de la figura 605. Consta de dos elementos principales: la cubeta de nivel constante y el cuerpo de carburación.

La *cubeta de nivel constante* C está en comunicación con el depósito de combustible. El nivel de la gasolina se mantiene siempre a la misma altura, merced a un flotador F que, al desplazarse, abre o cierra por medio de una aguja P la entrada de la gasolina del depósito; así, la gasolina que se deja entrar depende de lo que se consuma, y es independiente del contenido del depósito.

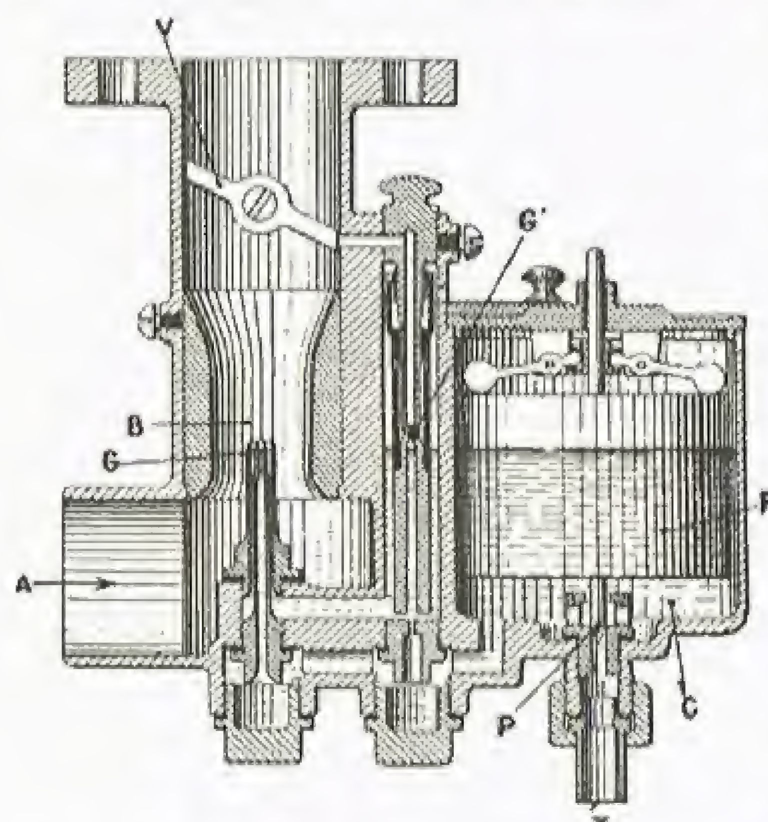


Fig. 605. — Corte esquemático de un carburador con inyector

El *cuerpo de carburación* consta de un *inyector* G, de sección rigurosamente calibrada, que ocupa su parte central, y que está rodeado de un conducto B o *tubo Venturi*, en el cual se efectúa la mezcla aire-gasolina.

El aire, que llega por un orificio, ha sido aspirado en A por la depresión que se produce en el cilindro motor durante el recorrido de admisión del émbolo, y arrastra la gasolina, que afluye al salpicador; esta agitación produce la pulverización de la gasolina y su mezcla íntima con el aire. La mezcla gaseosa así preparada penetra en el motor por un orificio, que el conductor varía a voluntad (*bisel* o *mariposa de los gases* V). Por medio de la manilla de los gases o del pedal del acelerador, el conductor también varía la cantidad de mezcla explosiva que llega al motor y, por consiguiente, la potencia que desarrolla.

Los carburadores modernos modifican *automáticamente*, según el régimen del motor, las proporciones respectivas de aire y gasolina; este automatismo se obtiene regulando, ya la cantidad del aire, ya la de gasolina, o la de ambas simultáneamente.

La mayoría de los automóviles emplea en nuestros días el carburador *invertido*, en el que el aire entra de arriba abajo y arrastra la gasolina en el mismo sentido, haciendo posible realizar mezclas más homogéneas; todos los carburadores llevan un pequeño carburador independiente especial para el *arranque* ("starter"), anejo al carburador principal, o bien una pequeña bomba que permite modificar el aflujo de gasolina, a fin de facilitar el arranque en tiempo frío.

En un carburador ordinario, la gasolina llega al tubo Venturi, en el interior de la tubería de admisión del motor, a un nivel superior al que el flotador mantiene en la cubeta, por lo cual es necesario que el motor aspire la gasolina, gracias a la depresión originada en dicho tubo Venturi, para que ascienda a un nivel que le permita mezclarse con la vena de aire. En marcha lenta, como la mariposa está cerrada, la aspiración del motor sobre el surtidor sería insuficiente, por lo cual hay que recurrir, en este régimen, a un surtidor especial G' que desemboca en el tubo de admisión ligeramente delante de la mariposa: es el *surtidor de marcha lenta*. Cuando se pasa de este *ralenti* a la marcha en plena carga, se va abriendo progresivamente la mariposa y el surtidor principal va entrando en juego.

De esta forma se pasa de un surtidor al otro, aunque no sin que se produzcan ciertos "fallos de carburación", al franquear el régimen transitorio. Con el carburador invertido, la gasolina avanza descendiendo desde la cubeta hasta que entra en el motor.

La gasolina afluye al conducto de admisión por debajo del nivel constante, y la vena de aire carburado llega a las válvulas de admisión por tubos en pendiente, y deja de ser necesario el carburador de marcha lenta. Una aguja, situada en el orificio del surtidor permite variar la sección de paso de la gasolina según el régimen del motor.

Como el carburador invertido está en el vértice de la tubería de admisión, la cubeta es alimentada por una bomba eléctrica o mecánica.

El carburador invertido permite un aumento de potencia del 10 al 12%, a regímenes elevados del motor.

Los carburadores de los motores de aviación son mucho más complicados que los de los motores de automóviles, puesto que deben en particular adaptarse automáticamente a las diferencias de presión exterior debidas a la altura.

Doble alimentación. — En ciertos casos se utilizan, además del surtidor de marcha lenta, otros dos surtidores. Uno de ellos está en constante comunicación con la cubeta de nivel invariable, y el otro, que está cerrado mientras el motor funciona a una potencia moderada, se destapa a partir de un cierto grado de abertura de la mariposa del acelerador, y entonces aumenta el aflujo de gasolina al motor.

Bomba de aceleración. — Esta bomba permite las aceleraciones rápidas y francas del motor; es una bomba cuyo pistón flotador, sumergido en la cubeta, está ligado mecánicamente a la mariposa. Si se acelera bruscamente, la bomba inyecta gasolina en la tubería de admisión lo que restablece la riqueza de la mezcla. Si se decelera poco a poco, la bomba se vacía lentamente, pero como su capacidad es pequeña, la cantidad suplementaria de gasolina que envía apenas influye en la riqueza de la mezcla.

Encendido. — Al final de la compresión, hay que provocar el encendido de la mezcla carburada; esta mezcla es fácilmente inflamable, porque la compresión ha aumentado su temperatura. Si esta compresión fuera excesiva, se llegaría incluso a un encendido espontáneo (*autoencendido*). Si llamamos v al volumen de la cámara de explosión y V al desarrollado por el pistón en el cilindro (cilindrada), $\frac{V + v}{v}$ es el valor de la compresión.

El encendido se provoca un poco antes de que el émbolo llegue al punto muerto superior (*avance del encendido*), para que toda la masa combustible esté ya inflamada en el momento en que el pistón alcanza dicho punto muerto superior; este avance debe ser tanto mayor cuanto más rápidamente gire el motor y cuanto más difícilmente inflamable sea la mezcla carburada (aumenta con el alcohol y el benzol en comparación con la esencia, y sube también con el enfriamiento del aire).

El encendido lo produce una chispa eléctrica a alta tensión que estalla, en la cámara de explosión, entre dos puntas metálicas unidas a una fuente de energía eléctrica, que es una magneto o una bobina de inducción, y a un interruptor alimentados por acumuladores. El dispositivo de dos puntas metálicas aisladas entre las cuales estalla la chispa se denomina "bujía".

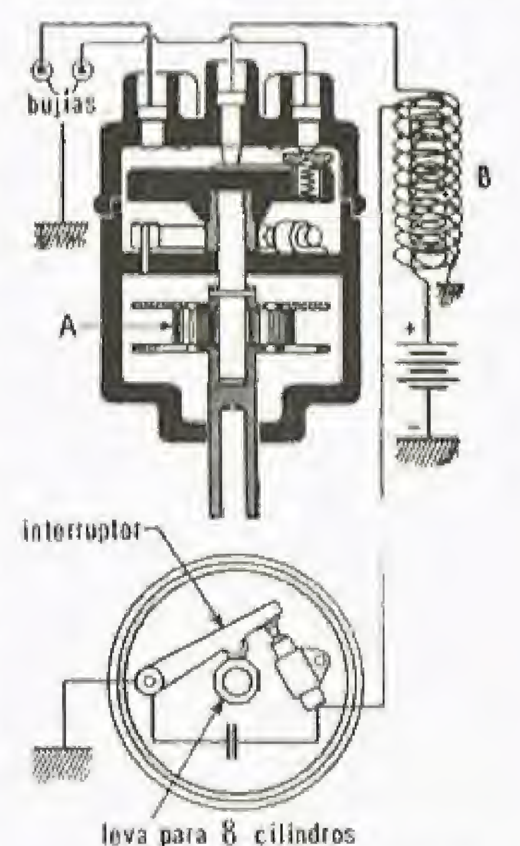


Fig. 606. — Mecanismo de encendido por batería (A, dispositivo de avance automático para el encendido; B, bobina de inducción)

La *magneto* proporciona una corriente tanto más intensa cuanto más rápidamente gira, pero a poca velocidad sólo da una corriente insuficiente (inconveniente en el arranque); la *batería de acumuladores* proporciona siempre la misma cantidad de electricidad, cualquiera que sea la velocidad, y por medio del encendedor (*delco*) [*fig.* 606] permite un arranque fácil y buenas recuperaciones de potencia en las pendientes.

Refrigeración. — El gran calor que se produce durante la explosión en el interior de los cilindros hace que sus paredes alcancen una temperatura elevada, que podría quemar el aceite del engrase necesario para el desplazamiento de los pistones; por esta causa, la pared del cilindro es hueca, formando una doble pared por la cual circula el agua empleada para refrigerar, que se enfría a su vez en el *radiador*.

En ciertos motores destinados a accionar un vehículo —automóviles, aviones, etc.— la refrigeración puede efectuarse por la simple acción del viento producido por el desplazamiento (refrigeración por aire).

Engrase. — El engrase de los mecanismos internos del motor se efectúa por burbujeo, o por circulación a presión. En el primer caso, las cabezas de biela, por medio de pequeños cangilones, extraen el aceite del cárter durante su movimiento de rotación y lo distribuyen por canalizaciones apropiadas.

En el engrase a presión, una bomba colocada en la parte baja del cárter envía el aceite a través de los canales perforados en el interior del cigüeñal y por las demás canalizaciones apropiadas.

Estado actual del motor de gasolina: su rendimiento. — El motor de gasolina tiene un rendimiento del 25 %, aproximadamente, netamente superior, pues, al de las máquinas de vapor, y es además mucho más ligero, pero quema un combustible mucho más caro. Se construyen, para la aviación, motores de una potencia superior a 4 000 HP, pero en este dominio, los reactores y los turbopropulsores le hacen una seria competencia. En cambio, su porvenir con respecto a la propulsión de automóviles parece asegurado durante muchos años todavía.

Motor Diesel. — Es un motor que utiliza ciertos productos pesados de la destilación del petróleo y, por consiguiente, menos caros que la gasolina. En estos motores, en lugar de introducir y pulverizar el combustible mediante aire comprimido, se le inyecta a una presión muy elevada (300 kg/cm^2). Para algunos combustibles muy espesos es necesario un calentamiento previo y un filtraje muy bueno, ya que los orificios del inyector son de $\frac{3}{10}$ a $\frac{5}{10}$ de milímetro.

El valor de la compresión, muy alto, provoca una elevación de la temperatura suficiente para producir el encendido. La combustión se hace a una presión sensiblemente constante, introduciendo progresivamente el líquido desde el final de la compresión.

Motores semi-Diesel. — En estos motores se evitan las dificultades de construcción debidas a las altas presiones, produciéndose el autoencendido, a una presión más baja, por una pared o por una "cabeza caliente" que se mantiene a elevada temperatura; pero, por esta causa, se pierde el beneficio del rendimiento elevado propio de la utilización de altas presiones. Además, el arranque es lento porque requiere el calentamiento previo de una pared. Este tipo de motor está en desuso desde que se consiguió adaptar el Diesel a las pequeñas potencias y a las velocidades relativamente grandes. Los semi-Diesel son en realidad motores de explosión sencillos y baratos gracias a su moderada compresión. Son de fácil manejo, pero difícilmente permiten la obtención de grandes velocidades.

Ventajas del motor Diesel. — Su rendimiento es del 33 al 35%, que es el más elevado entre los motores térmicos. Las fuertes presiones exigen, en cambio, órganos muy robustos; los dispositivos de compresión del aire y de insuflamiento del combustible son de difícil ejecución y su fabricación es costosa. Estos motores ofrecen ventajas principalmente en las instalaciones de gran potencia; su consumo es menor que el de los motores de explosión y presentan mayor aptitud para quemar los más pesados combustibles líquidos, difícilmente inflamables y de precios muy reducidos

El motor Diesel tiende a sustituir cada vez más la máquina de vapor, tanto en las pequeñas instalaciones de producción de energía eléctrica como en la propulsión de navíos y locomotoras; también los camiones de gran tonelaje van equipados con motores de este tipo.

Motores de turbina

Turbinas hidráulicas: Reseña histórica. Principales tipos de turbinas. Ruedas Pelton. Ruedas Francis. Turbinas de hélice. Turbinas Kaplan. — **Turbinas de vapor:** Turbina de reacción. Turbina de acción. Turbina Rateau. Evolución de las turbinas. Turbina de contrapresión. — **Turbinas de gas:** Compresores. Cámara de combustión. La turbina de gas. Empleo de las turbinas de gas

Turbinas hidráulicas

Reseña histórica. — Las ruedas hidráulicas ya se utilizaban hace más de 3 000 años en China y en Egipto; **Euler** inventó en 1754 la turbina paralela con coronas superpuestas, pero este tipo de motor apenas se extendió, y hasta 1827 no inventó **Fourneyron** (1802-1867), la turbina, que es la forma utilizada en nuestras fábricas modernas. (El nombre de turbina hidráulica se debe a **Burdin,** 1824.)

Principales tipos de turbinas. — Las turbinas hidráulicas se dividen en *turbinas de reacción y turbinas de impulsión.* En las primeras los álabes o cangilones están sumergidos, es decir, que funcionan bajo la presión del agua que los cubre (Fontaine-Jonval). En las segundas, en cambio, el agua, aun sin dejar de ejercer su acción motriz, circula al aire libre (ruedas Pelton, Gérard, Francis).

Estas dos categorías de turbinas se subdividen a su vez en tres tipos diferentes: las turbinas radiales, donde el agua actúa en la dirección de los radios (Fourneyron) [*fig.* 607]; las turbinas axiales, en las que la acción del agua se ejerce paralelamente al eje (Fontaine); y, por último, las turbinas norteamericanas o mixtas, en las cuales el agua actúa en las dos formas citadas.

En la actualidad, todos los tipos se han sustituido por dos grandes sistemas de origen norteamericano: la rueda de acción, que utiliza cascadas tangentes a la rueda (rueda de Pelton) [*fig.* 608], y la rueda de reacción centrípeta paralela, donde el agua es llevada por un distribuidor hasta planos perpendiculares al eje, siendo después desviada paralelamente a éste (rueda Francis).

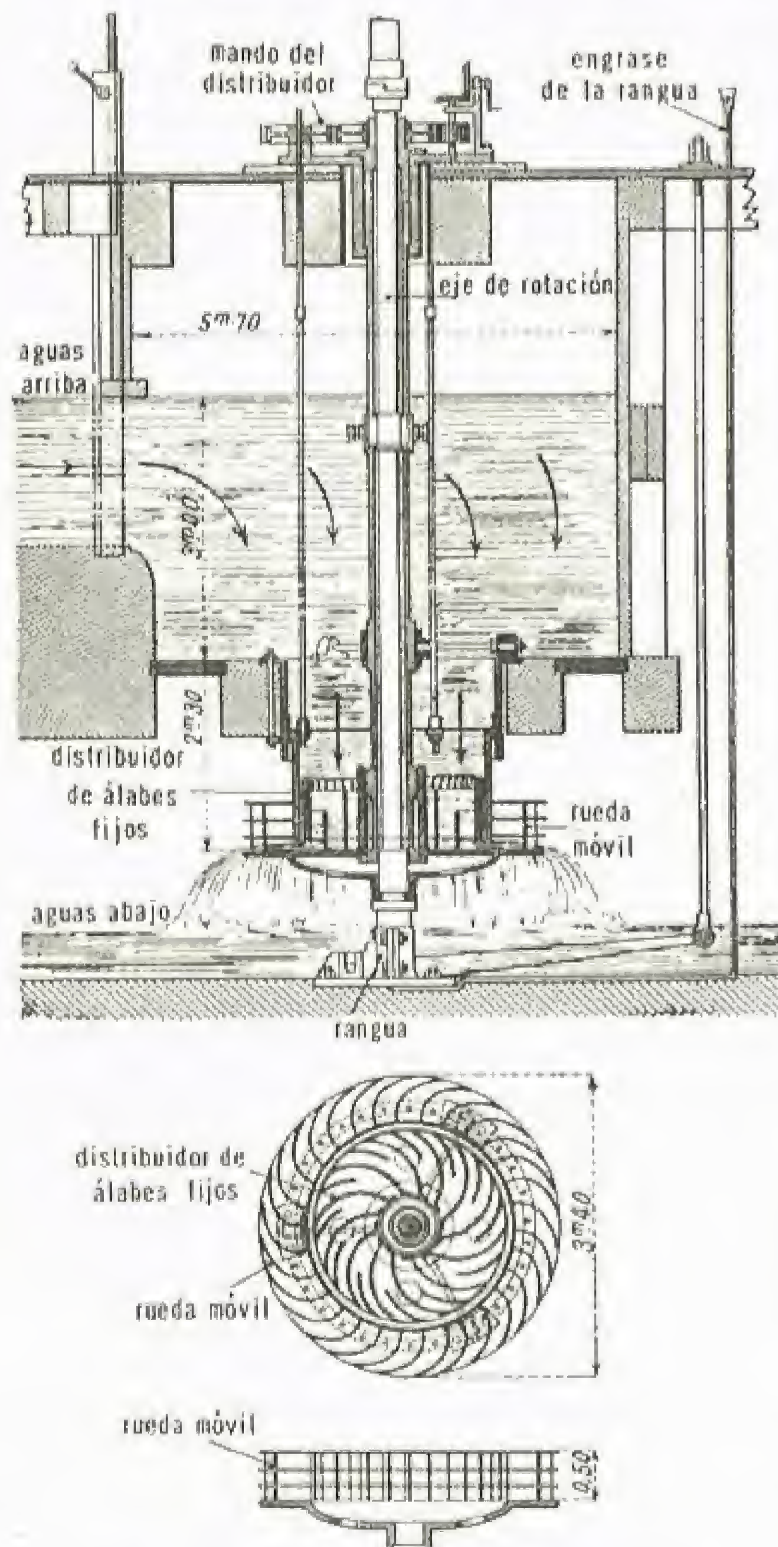


Fig. 607.—Turbina Fourneyron

Ruedas Pelton. — Están indicadas para saltos de grandes alturas, y se construyen con árbol horizontal. En principio, este tipo de turbinas consta de una rueda, a cuya llanta se sujetan los álabes con pernos, y de uno o varios inyectores, que terminan en un conducto de forma de lámina y sección circular.

En América se han construido máquinas de 30 000 HP de potencia.

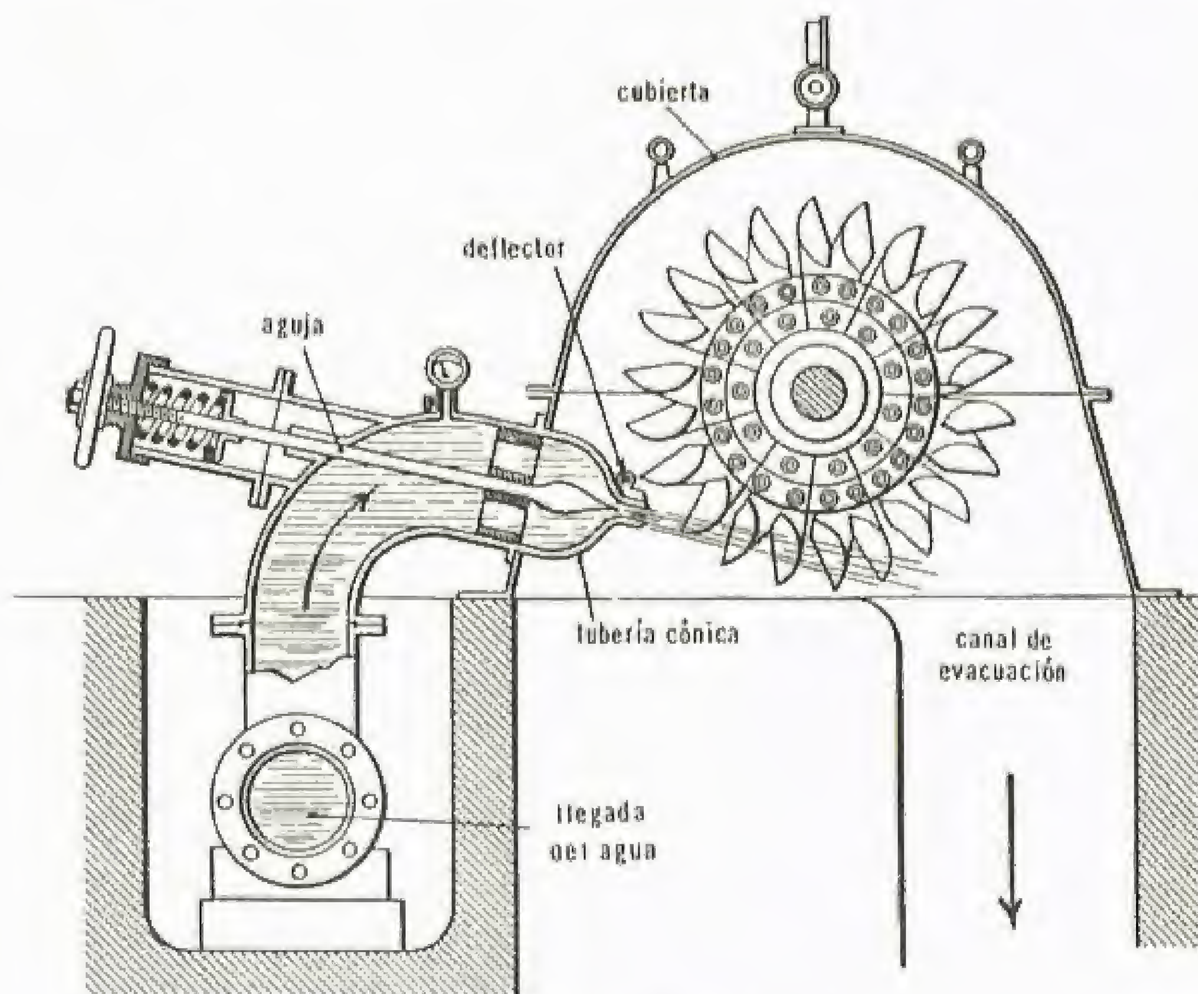


Fig. 608.—Rueda Pelton

Ruedas Francis. — Estas turbinas se construyen con eje vertical u horizontal para saltos de poca altura o de altura normal y con ellas se obtienen grandes velocidades de rotación.

Existen turbinas Francis del orden de 80 000 HP.

Turbinas de hélice. — Para los saltos de poca altura se construyen actualmente ruedas llamadas "hélices", en las cuales se combinan, con la antigua teoría de las turbinas, las teorías aplicadas a las alas de avión, lo que duplica o triplica la velocidad de rotación. Aunque el distribuidor es siempre centrípeto y la abertura regulada por pequeñas compuertas móviles, las antiguas ruedas se desplazan en este sistema dentro del tubo de aspiración y han sido sustituidas por ruedas con un restringido número de álabes (dos o cuatro), de forma de hélice y corta longitud; a veces se las hace orientables, de forma que

presenten un ángulo de ataque favorable a las diversas aberturas del distribuidor.

Turbinas Kaplan. — El rendimiento de las turbinas de hélice disminuye mucho, desgraciadamente, en cuanto se apartan por una u otra razón del régimen óptimo, de forma que deben utilizarse con carga constante; este inconveniente desaparece con las turbinas Kaplan, en las cuales las palas de la rueda-hélice son orientables por el regulador, al mismo tiempo que las directrices.

Turbinas de vapor

En estas turbinas, la energía disponible es almacenada en el vapor, debido a la diferencia de presión que existe entre la caldera y el condensador; esta energía se transforma primero, total o parcialmente, en energía cinética, por expansión en los distribuidores fijos, especies de coronas con álabes; después, los numerosos chorros de vapor obtenidos se dirigen a gran velocidad contra las aletas de una rueda encastrada en un árbol, y la hacen girar. Las aletas de la rueda tienen una forma curva especial que hace que el vapor pierda a la salida casi toda su velocidad (v. p. 59).

Turbina de reacción. — Mover una rueda por la acción directa del vapor no es una idea moderna, si bien su primera aplicación industrial data de 1884. **Parson** (n. en 1854) construyó la turbina de expansión fraccionada, expansión que se proseguía de manera continua en las coronas fijas y móviles. Los álabes fijos se disponían en el interior de un cilindro envolvente, y los móviles en la periferia de un tambor de acero forjado. Las primeras *turbinas Parsons* se caracterizaban por su gran número de álabes *a reacción*, montados sobre uno o varios tambores, y por el empleo de un émbolo de equilibramiento destinado a compensar el empuje debido a la reacción; de ahí el nombre con que se ha designado este tipo de turbinas.

En estas turbinas, la acción del vapor es debida a la presión que ejerce su expansión en los álabes de la rueda, tanto por su fuerza viva como por la potencia de la expansión. Las turbinas de reacción son siempre de inyección total, es decir, que el vapor es admitido en todo el recorrido de la rueda.

Fig. 609. — *A la izquierda*, turbina de acción; *a la derecha*, turbina de reacción

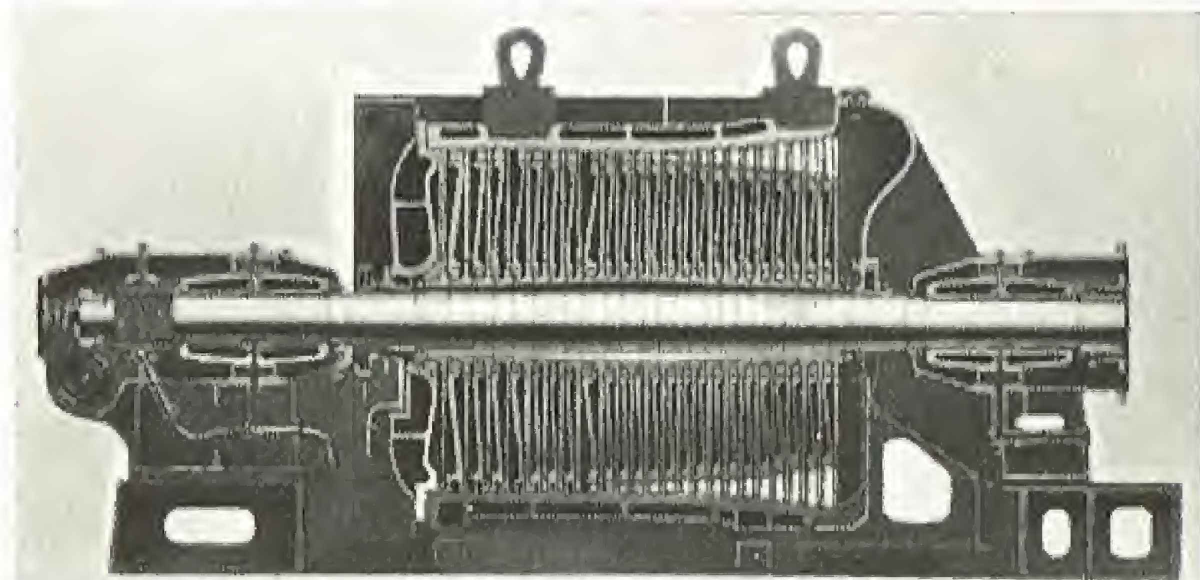
Turbina de acción. — En la *turbina de acción* el vapor actúa únicamente por su fuerza viva (*fig.* 609). Basándose en este principio, el sueco **De Laval** (1845-1913), perfeccionó su turbina (1887). La expansión se efectúa de una sola vez, desde la presión de las calderas hasta el condensador, en un órgano fijo llamado tobera; la inyección es, en este caso, parcial.

Hugoniot estudió la forma de la tobera y demostró que debe ser primero convergente y luego divergente, es decir, que debe presentar un estrechamiento.

Esta expansión única producía una gran velocidad del vapor, del orden de 1 000 a 1 200 m/s, que arrastraba la rueda a una velocidad periférica que no debía ser inferior a 400 m/s. Para conseguir estas grandes velocidades, De Laval fijó los álabes a un disco macizo sostenido por un árbol flexible.

La velocidad de estas turbinas hace que se utilicen para accionar las dinamos o los ejes de los torpederos. Sus principales defectos eran la limitación de su potencia máxima a unos cuantos centenares de caballos, la disminución del rendimiento a presiones de vapor algo elevadas, y la necesidad de emplear un engranaje reductor de velocidad.

Turbina Rateau. — Para reducir la velocidad del vapor, Rateau tuvo la idea de fraccionar la expansión entre varias ruedas separadas por distribuidores, que eran recorridas sucesivamente por el flujo del vapor. La turbina Rateau es, pues, una turbina *multicelular* de acción.



Turbina Rateau, de 24 etapas de presión y 5 000 a 6 000 HP a 750 r. p. m.

La expansión se fracciona en varias fases de presión; cada una de éstas tiene una corona de álabes distribuidores en los que se produce la expansión, y un disco con aletas móviles atravesadas por el chorro de vapor a presión constante (el diámetro y la longitud de la rueda, así como el número de los álabes, aumenta desde la entrada hasta la salida del vapor). Los álabes distribuidores se colocan en la periferia de un diafragma de dos piezas, girando así cada rueda en una célula casi impermeable constituida por dos diafragmas sucesivos.

Este montaje presenta una gran ventaja desde el punto de vista de la reducción de fugas, y el empuje axial es prácticamente nulo; en cambio, las pérdidas por frotamiento son mayores.

Evolución de las turbinas. — Se ha reconocido la ventaja de la reacción para las fases de baja presión, que permite una velocidad menor del vapor, y la necesidad de la acción en los álabes de alta presión, donde las fugas en las juntas y el empuje son más importantes, y donde es necesario reducir rápidamente la presión y la temperatura del vapor (turbina combinada Brown-Boveri-Parsons). Para mejorar el rendimiento ha habido también necesidad de constituir una turbina de varios cuerpos; no se pueden montar sobre el mismo árbol el cuerpo de alta presión y el de baja presión, porque este último gira a una velocidad relativamente pequeña.

Citemos una turbina Brown-Boveri de 1 500 revoluciones, 85 000 kW de potencia, y de tres cuerpos: alta presión, media presión y baja presión.

Se ha aumentado la presión del vapor, actualmente de 30 a 40 kg/cm^2, en lugar de los 14 kg/cm^2 de 1914; para aumentar el rendimiento, se calienta el agua de alimentación y se prevén otros recalentamientos intermedios durante la expansión.

Rateau ha utilizado el vapor de escape de las máquinas alternas (acerías, forjas, minas), por medio de un *acumulador* que regulariza el flujo de escape, en una turbina de baja presión. La alta presión es alimentada con el vapor vivo de las calderas; se tiene así la *turbina de dos vapores:* presión de vapor constante en el acumulador y velocidad de rotación constante en la turbina.

Turbina de contrapresión. — Gran número de industrias químicas utilizan una importante cantidad de vapor para los calentamientos. El mejor procedimiento es tomar este vapor del escape de una turbina de contrapresión; así se simplifica el aparato, al suprimirse las ruedas y el condensador, y se cuadruplica el rendimiento al evitarse la pérdida de calor en el condensador.

El empleo de estas máquinas de contrapresión se limita al caso en que los calentamientos son lo bastante importantes para absorber en todo momento la totalidad del vapor de escape. Si no se da esta condición permanentemente, hay que recurrir al empleo de la *turbina de extracción de vapor.* En estas turbinas, la toma del vapor para el calentamiento no se hace en el escape, sino entre dos fases consecutivas.

Turbinas de gas

La turbina de gas es aquella en la que el fluido es aire previamente comprimido, y que después alcanza una elevada temperatura (prácticamente, de 500 a 700° C). Una turbina de gas consta, pues (*fig.* 610), de un compresor, una cámara de combustión o calentamiento y, por último, la propia turbina. La energía disponible es igual a la diferencia entre la producida por la turbina y la que exige la compresión del aire; el fenómeno es, en realidad, análogo al de un motor de combustión interna, pero los tres tiempos de compresión, combustión y expansión se realizan en diferentes órganos, lo que permite una gran flexibilidad de marcha y la posibilidad de utilizar ciclos termodinámicos variados. Lo que acaba de decirse sobre la energía disponible pone de manifiesto que el rendimiento de una turbina de gas será tanto mayor cuanto menos energía absorba el compresor. En realidad, lo que ha retardado la utilización de la turbina de gas ha sido el ignorarse durante mucho tiempo la manera de construir compresores de gran rendimiento.

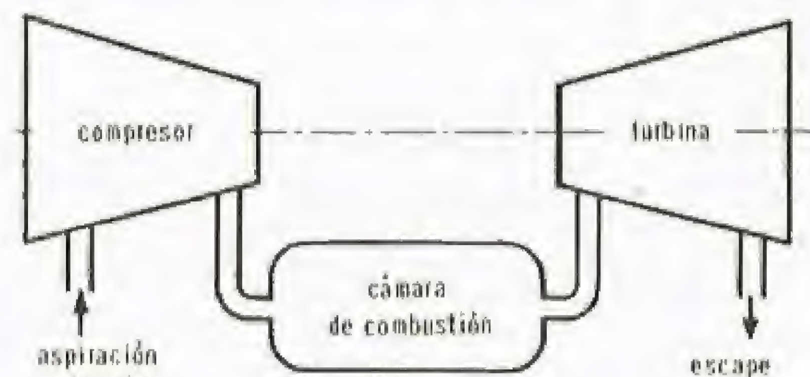


Fig. 610

Compresores. — Se utilizan sobre todo compresores rotatorios arrastrados por la turbina sobre el mismo árbol, si bien, en principio, nada impide el empleo de otros tipos de compresores, como veremos un ejemplo algo más adelante. Un compresor rotatorio es en realidad una turbina que funciona en sentido inverso; el aire es arrastrado y comprimido por álabes. Para obtener valores de compresión elevados (25 a 30), el compresor es de varias etapas. Corrientemente se construyen compresores de 12 etapas, llamándose al compresor *centrífugo* o *axial*, según que el aire circule por la periferia o siguiendo el eje; el primero es más sólido, pero más pesado, por lo que en aeronáutica se emplea principalmente el segundo.

Cámara de combustión. — El aire comprimido procedente del compresor puede calentarse por combustión interna de una mezcla combustible que se introduce a este efecto, o por un hogar exterior. En el primer caso, los gases calientes deben evacuarse después de pasar por la turbina, que se llama en este caso de *circuito abierto.* En el segundo caso, puede volverse a utilizar el aire que sale de la turbina,

puesto que no se ha alterado con los productos de la combustión. El calor residual que contiene no se ha perdido, y la turbina se llama entonces de *circuito cerrado*. En una turbina de circuito abierto solamente se pueden utilizar combustibles que no produzcan cenizas ni depósitos (productos petrolíferos ligeros y gas), mientras que la turbina de circuito cerrado se acomoda a toda clase de combustibles. Las cámaras de combustión son muy sencillas; deben sólo, sencillamente, estar construidas con materiales muy refractarios y garantizar una combustión perfecta. En las turbinas de gas pueden asociarse el compresor y la cámara de combustión en un mismo órgano: el compresor de émbolo libre (*fig.* 611), constituido por dos cilindros coaxiales de diámetros diferentes en los que se mueven dos émbolos libres mutuamente solidarios. La combustión se produce en el cilindro A y provoca el desplazamiento de ambos émbolos y la compresión del aire en el cilindro B, que luego se introduce en el cilindro A, y el ciclo recomienza.

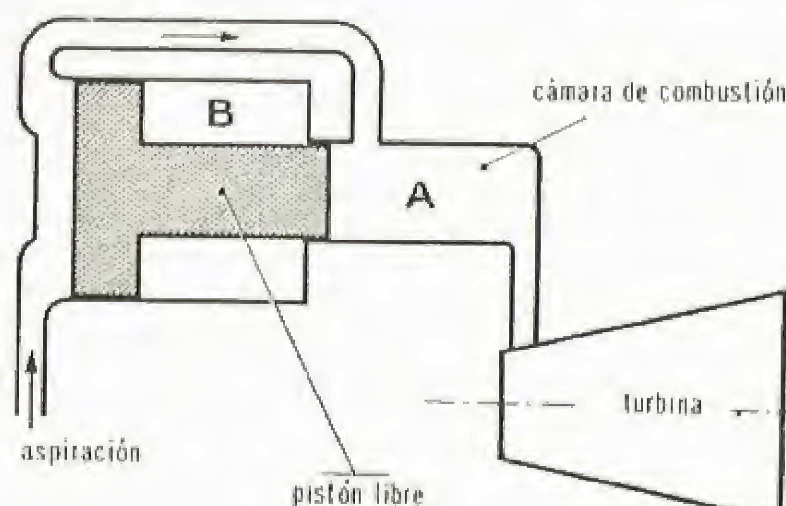


Fig. 611

Turbina. — La turbina no difiere, en esencia, de la de vapor, o más bien del compresor rotatorio, pero casi no se utilizan más que turbinas coaxiales, que pueden tener una o varias etapas; las de los motores de aviones no tienen más de tres o cuatro. Estas turbinas giran a gran velocidad, habiéndose llegado a las 15 000 revoluciones/minuto, y los materiales de que están compuestas se hallan sometidos a duras condiciones de funcionamiento a causa de la elevada temperatura que soportan y de la fuerza centrífuga. Las modernas aleaciones no permiten que las turbinas de gas funcionen a temperaturas superiores a 750 grados. A esta temperatura, el rendimiento es del orden del 20%, el cual aumentaría enormemente con una temperatura superior.

Empleo de las turbinas de gas. — El principal empleo de las turbinas de gas es, en la actualidad, la aeronáutica. Se distinguen los turbopropulsores, en los cuales la turbina sirve únicamente para hacer girar una hélice, y los turborreactores, en los que el gas de escape de la turbina produce un empuje (v. REACTORES); es decir, que es, en resumen, una combinación de turbina de gas y de reactor. También existen turbinas de gas fijas, de grandes potencias, para la producción de energía eléctrica, construyéndose igualmente, aunque sólo a título de ensayo, automóviles con turbina de gas.

Reactores

Los *reactores* o *propulsores de reacción* son movidos por el empuje que la eyección por su parte trasera de una masa de gases dotada de gran velocidad ejerce sobre ellos, en sentido contrario; este empuje es igual a la reacción sobre el propulsor de la fuerza que lanza los gases, análogamente a como el retroceso de un arma de fuego es debido a la reacción sobre dicha arma de la fuerza que imprime al proyectil su velocidad inicial. El movimiento es debido únicamente a dicha reacción, producida por la salida de las masas gaseosas, sin que sea necesario recurrir a cualquier otro apoyo en el aire exterior, como se creyó durante mucho tiempo equivocadamente. La propulsión por reacción no queda limitada, gracias a sus diferentes formas, al estricto dominio atmosférico, como lo prueban los cohetes que ya han salido de la atmósfera, en especial los que han permitido el lanzamiento de los satélites artificiales.

De manera general, todos los propulsores utilizados tanto en aeronáutica como para los cohetes y, con mayor razón, en astronáutica, son propulsores a reacción, puesto que la propia hélice, prescindiendo de su efecto de arrastre, lanza también tras ella, al remover el aire, masas gaseosas.

Los reactores pueden clasificarse ya atendiendo a su campo de utilización, ya a su funcionamiento mecánico. Si se considera el primero, pueden distinguirse los *propulsores de reacción aerobia*, que toman de la atmósfera exterior el oxígeno necesario para su combustión interna, y los *propulsores de reacción anaerobia*, que llevan una fuente de oxígeno autónomo, o emplean un proceso de funcionamiento diferente del químico, como por ejemplo la utilización de energía nuclear. Desde el punto de vista del funcionamiento mecánico, pueden distinguirse los propulsores que utilizan el *movimiento alterno* (motores de émbolo), los que utilizan el *movimiento circular* (turbopropulsores y turborreactores), y los que no llevan prácticamente ninguna pieza en movimiento; pulsorreactores, estatorreactores y cohetes.

Desde el punto de vista termodinámico, los diferentes propulsores a reacción presentan una estrecha analogía (v. el esquema siguiente).

El *motor de émbolos que mueve una hélice* debe considerarse como un propulsor de reacción aerobia que utiliza el movimiento alterno y funciona según el ciclo de cuatro tiempos, que vuelve a encontrarse en todos los demás propulsores (v. AERONÁUTICA, p. 207).

Los *turbopropulsores* y *turborreactores* constan de los mismos elementos internos, basados en el movimiento circular. Sin embargo, mientras que en el turbopropulsor la mayor parte de la expansión de los gases actúa sobre los álabes de la turbina, produciendo al mismo tiempo el movimiento del compresor y de la hélice, en el turborreactor actúa en la tobera terminal, por reacción directa, ya que en el turborreactor no existe hélice; en cambio, en el turbopropulsor, la expansión de los gases en la tobera sólo proporciona un ligero empuje adicional (véase AERONÁUTICA, p. 207).

En los *pulsorreactores* y *estatorreactores*, que no llevan ningún órgano importante en movimiento, la compresión es debida a su velocidad de desplazamiento, siendo la combustión la que proporciona la energía necesaria para la eyección (v. AERONÁUTICA, p. 207).

Los *cohetes* o *motores-cohetes*, de funcionamiento, ya químico, ya nuclear, son los únicos propulsores a reacción anaerobios conocidos y, por consiguiente, los únicos que pueden salir de la atmósfera (v. COHETES, p. 211 y ASTRONÁUTICA, p. 213).

MOTOR COHETE
ESTATORREACTOR
TURBORREACTOR
TUBOPROPULSOR
MOTOR DE PISTONES
COMPRESIÓN ADMISIÓN
COMBUSTIÓN EXPLOSIÓN
EXPANSIÓN ESCAPE
ningún movimiento interno importante
movimiento circular
movimiento alterno
PROPULSIÓN ANAEROBIA
PROPULSIÓN AEROBIA

Energía hidráulica

Disposición general de los sistemas de utilización de esta energía. — **Embalses:** Reseña histórica. Presas de gravedad. Presas de bóveda. Presas de bóvedas múltiples. Presas de vertedero. Diques. Construcción de los embalses. Construcciones anejas. — **Centrales hidroeléctricas:** Conducciones forzadas

Disposición general de los sistemas de utilización de esta energía. — La energía hidráulica, también denominada *hulla blanca*, es transformada primeramente en energía mecánica, para lo cual es necesario *captar* la caída del agua. A tal efecto se establece un embalse aguas arriba del lugar elegido para instalar el sistema de turbinas, que puede consistir en un lago natural o en un *embalse* propiamente dicho, creado artificialmente por medio de una *presa*. Este embalse permite la acumulación de las aguas, cuyo caudal varía mucho según la estación, y alimenta una *cámara de toma de carga*, de la que parte una *conducción forzada*, es decir, a presión, que lleva el agua hasta las *turbinas*. Las turbinas transforman la energía cinética adquirida en las conducciones por el agua en energía mecánica, que es a su vez transformada en energía eléctrica.

Embalses

Reseña histórica. — Los primeros embalses conocidos datan de la más remota Antigüedad. Fueron creados para retener las corrientes de agua y permitir así cultivar y poblar los terrenos estériles, y han contribuido al desarrollo de la civilización.

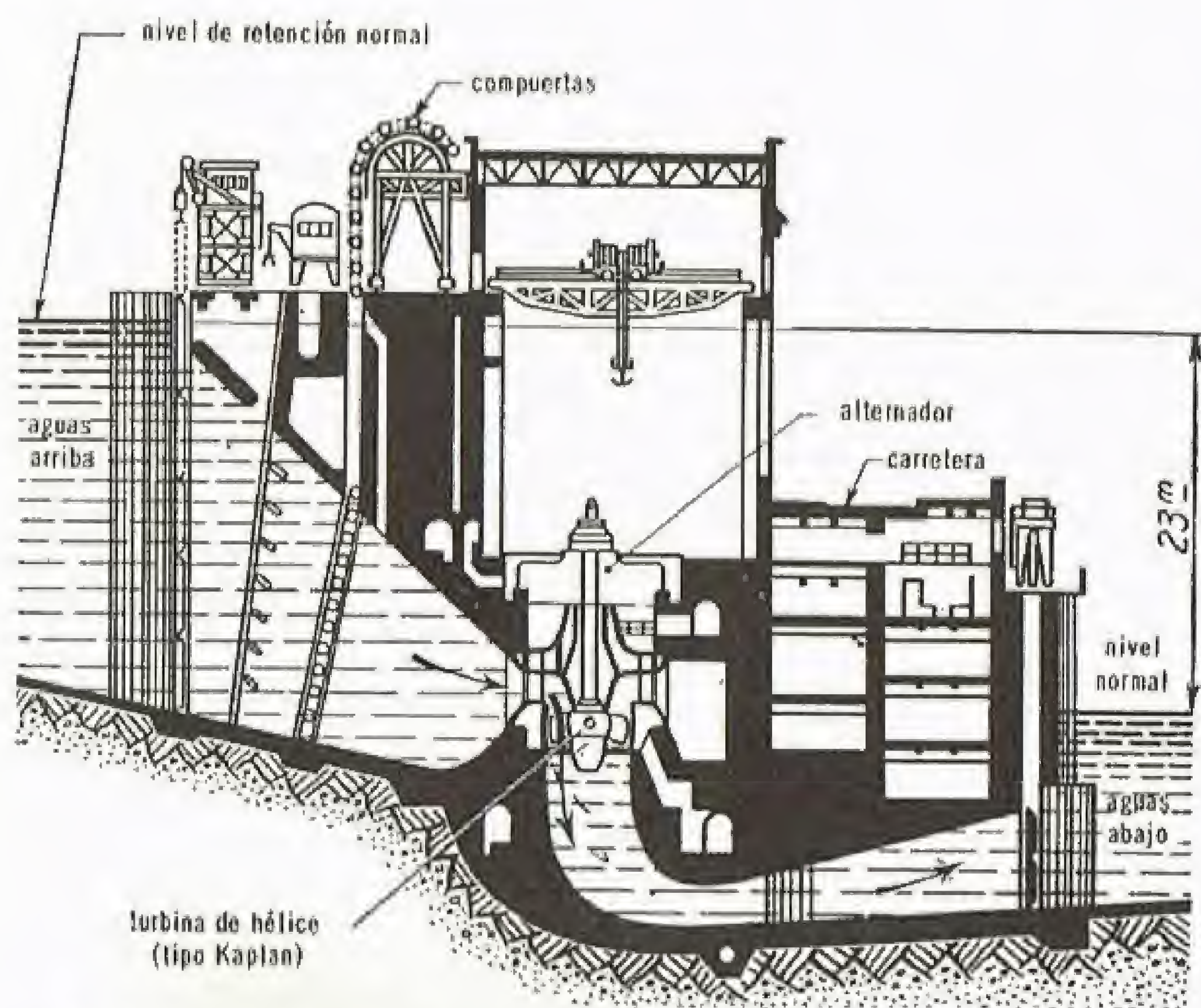
En la India se encuentran grandes obras de tierra de construcción muy antigua. Los embalses más importantes de mampostería de los tiempos modernos datan del siglo XVI, en España. Pero la construcción racional de los embalses sólo empieza a fines del siglo XIX; la ciencia de la construcción de embalses es esencialmente francesa; los métodos de cálculo creados por Sazilly y Delocre se aplicaron por primera vez al embalse de Rochetaillée o del Gouffre d'Enfer, en el Furens (1861-1866), que surte de agua potable a la ciudad de Saint-Etienne. Este embalse fue considerado como clásico durante mucho tiempo en Francia y en el extranjero. Ese tipo ha sido reemplazado poco a poco, sin alterar sus formas esenciales, por el embalse de presa de perfil triangular, llamado también *presa de gravedad*.

El elemento esencial de los embalses es la presa, que consiste en una pared impermeable que retiene en un punto determinado un curso de agua. El embalse típico se encuentra siempre situado en la parte alta de los valles, en un desfiladero estrecho bordeado por rocas duras sin fallas ni arcilla, y con un subsuelo impermeable; aguas arriba del embalse, el valle se dilata ampliamente, en terrenos de poco valor económico y de recursos hidráulicos suficientes.

Las presas pueden clasificarse en *presas depósitos* (grandes alturas), *presas vertederos* (alturas medias) y *diques* (pequeñas alturas).

Presas de gravedad. — Son presas de perfil triangular y fuertes muros cuyo espesor disminuye a medida que se elevan, puesto que la presión que tienen que soportar es cada vez menor. El muro debe resistir por su propio peso a la doble presión de las aguas, presión horizontal y presión vertical, y transmitir íntegramente las presiones que recibe tanto a los cimientos básicos como a las paredes de apoyo.

Presas de bóveda. — En este tipo de presa se ha tratado de reducir el volumen de la mampostería haciendo que el empuje de las aguas recaiga sobre los puntos de apoyo laterales, en los flancos del valle, basándose en el mismo principio adoptado para las bóvedas o arcos de los puentes y viaductos. En los embalses de este tipo, la proyección horizontal es un arco de circunferencia, con su convexidad en el sentido de la procedencia de las aguas.



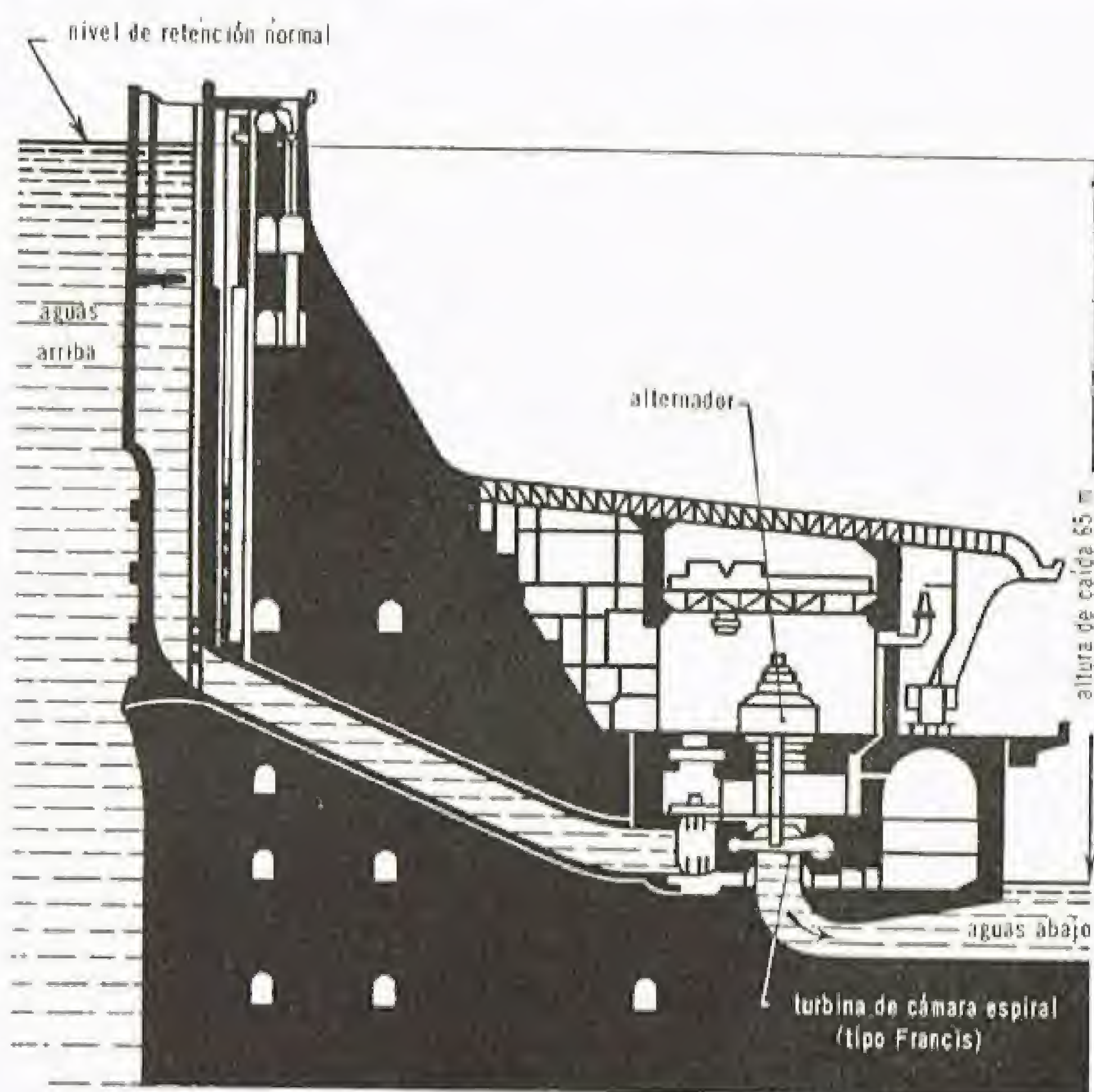
Corte esquemático de la central Blondel, en el embalse de Donzère-Mondragon (Francia)

Presas de bóvedas múltiples. — Cuando las paredes del valle están muy distantes, se construyen varias bóvedas soportadas por contrafuertes intermedios. El intervalo entre los contrafuertes lo constituye una pared de forma semicilíndrica, o sea una bóveda, pero con su eje inclinado 45° sobre la vertical. La presión de las aguas es transmitida por las bóvedas a los contrafuertes, y de éstos a los cimientos; en algunos casos, los contrafuertes están reforzados por vigas longitudinales. La altura de estas presas apenas excede de 40 m, mientras que las presas de una sola bóveda sobrepasan generalmente los 100 m de altura.

La construcción de estos tipos de presa ha sido posible gracias al hormigón armado; hoy día se construyen, incluso en valles relativamente anchos, presas de bóveda en lugares donde en otra época se habrían construido pesadísimas presas de perfil triangular.

Presas de vertedero. — Se construyen en los ríos de débil pendiente; son de poca altura, y funcionan en vertedero con objeto de crear un salto (toma de aguas, central) o un desnivel (canal de derivación).

Este tipo de presas se construyen como las de los grandes embalses, de los que sólo se distinguen en los detalles: la cresta del perfil de aguas abajo, por ejemplo, está redondeada y empalma con el fondo formando



Corte esquemático de la presa y la central de Génissiat (Francia)

una escocia, con objeto de poder encauzar la cascada y evitar los torbellinos en la base. Se dispone una protección particular contra los socavones aguas arriba, y contra las presiones de caída, aguas abajo.

Estas presas, merced a sus compuertas móviles, no ofrecen resistencia a las crecidas de los ríos de gran caudal.

Diques. — Cuando el suelo es malo, los cimientos tienen que ser muy extensos y la presa sólo puede retener una pequeña cantidad de agua, convirtiéndose entonces en un dique que puede ser de tierra arcillo-arenosa, de una mezcla de tierras diferentes o de mampostería, metal u hormigón, según las regiones.

Los *diques de tierra* han progresado gracias a la adopción del sistema de terraplenado hidráulico, que ha permitido construcciones de importancia excepcional, por ejemplo, en Panamá, el embalse de Gatún, de 2 340 m de longitud, 800 m de espesor en su base, 35 m de altura, y 19 millones de metros cúbicos de volumen.

Construcción de los embalses. — Los medios de construcción han adquirido enorme desarrollo: el problema capital, en materia de embalses, es el de los cimientos. Los progresos realizados en materia de levantamientos topográficos han facilitado la elección del emplazamiento.

El tratamiento del suelo se ha mejorado con el empleo de inyecciones de cemento que permiten rellenar las fisuras hasta una profundidad de cientos de metros; a veces se inyecta alquitrán u otros productos químicos.

Todos los grandes embalses se construyen actualmente de hormigón, salvo a grandes alturas, en que se construyen de fábrica. Aunque el hormigón presenta ciertos inconvenientes con respeco a la fábrica —una mayor contracción y calentamiento—, es, en cambio, mucho más impermeable, y permite, gracias a la regularidad de los cementos y a un mejor

conocimiento de los efectos de la granulometría, garantizar una resistencia y una impermeabilidad excelentes.

Se llega a fabricar y colocar 3 000 m³ de hormigón por día.

Construcciones anejas. — Los embalses están provistos de evacuadores para las crecidas, de aparatos para su vaciado y de tomas de agua.

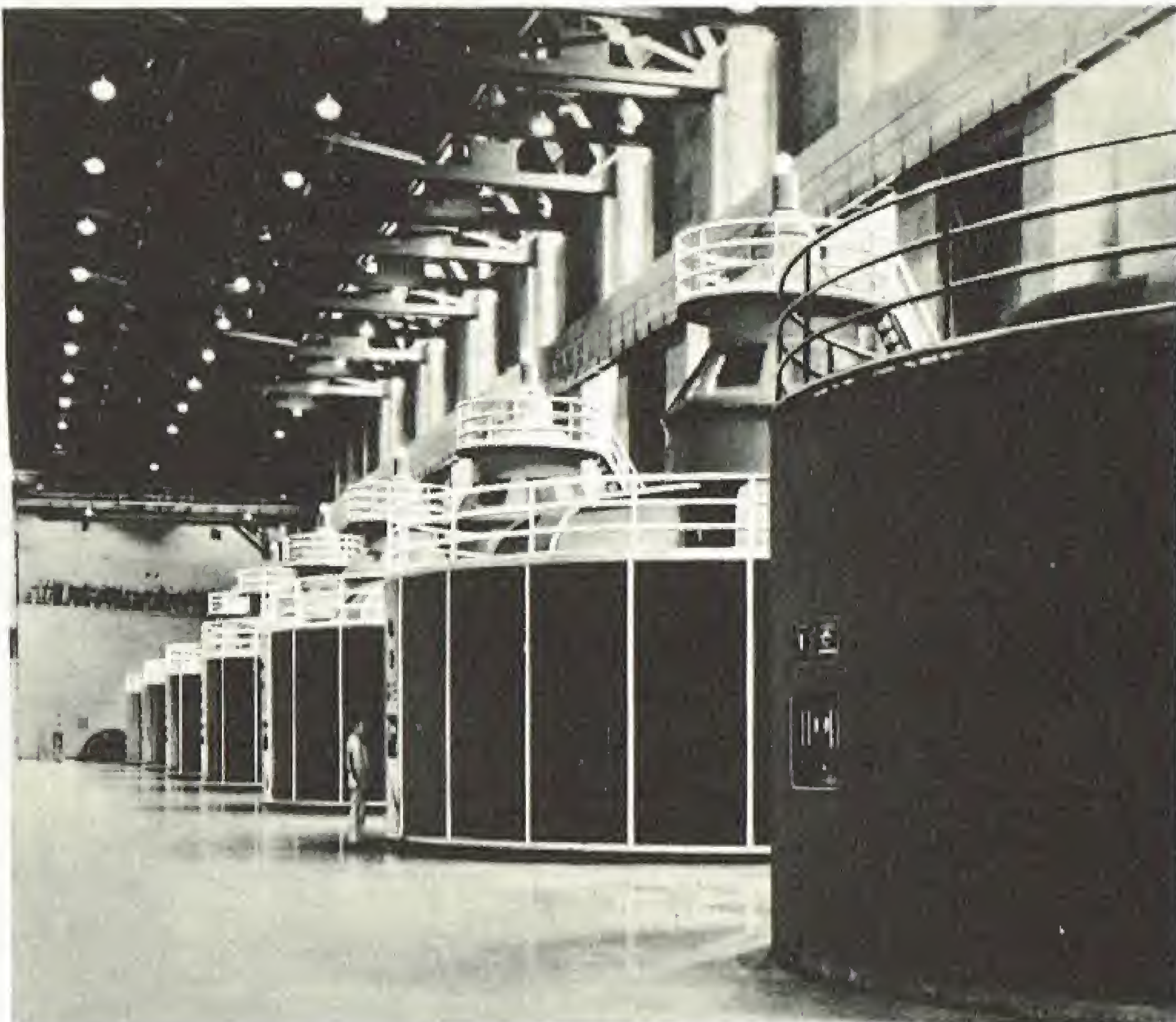
Para la evacuación en caso de crecida se prefiere disponer de compuertas normales, en vez de compuertas automáticas, que se reservan para evacuar parte de las grandes crecidas.

Los diversos tipos de compuerta de fondo (de campana, etc.), se han perfeccionado mucho: tienen que permitir que el embalse se mantenga seco en épocas de estiaje o de pequeñas crecidas a fin de poderse realizar las visitas periódicas de control. Ciertos dispositivos tienen compuertas de aligeramiento o válvulas, cuya función es permitir un vaciado brusco, en caso de que la presa amenace romperse.

Centrales hidroeléctricas

Son centrales (v. *figs.* 613 y 614) en las que se retiene toda el agua en lagos naturales o artificiales con presas que permiten proporcionar en cada momento la energía necesaria para las necesidades del consumo.

Se han creado centrales con embalses de dos tipos: los embalses anuales o estacionales, destinados a regularizar el caudal durante el año, y los embalses horarios, cuyo objeto es seguir el consumo en sus variaciones diarias.



Turboalternadores que abastecen de corriente eléctrica el Valle Imperial (E. U. A.) [*Fot. U. S. I. S.*]

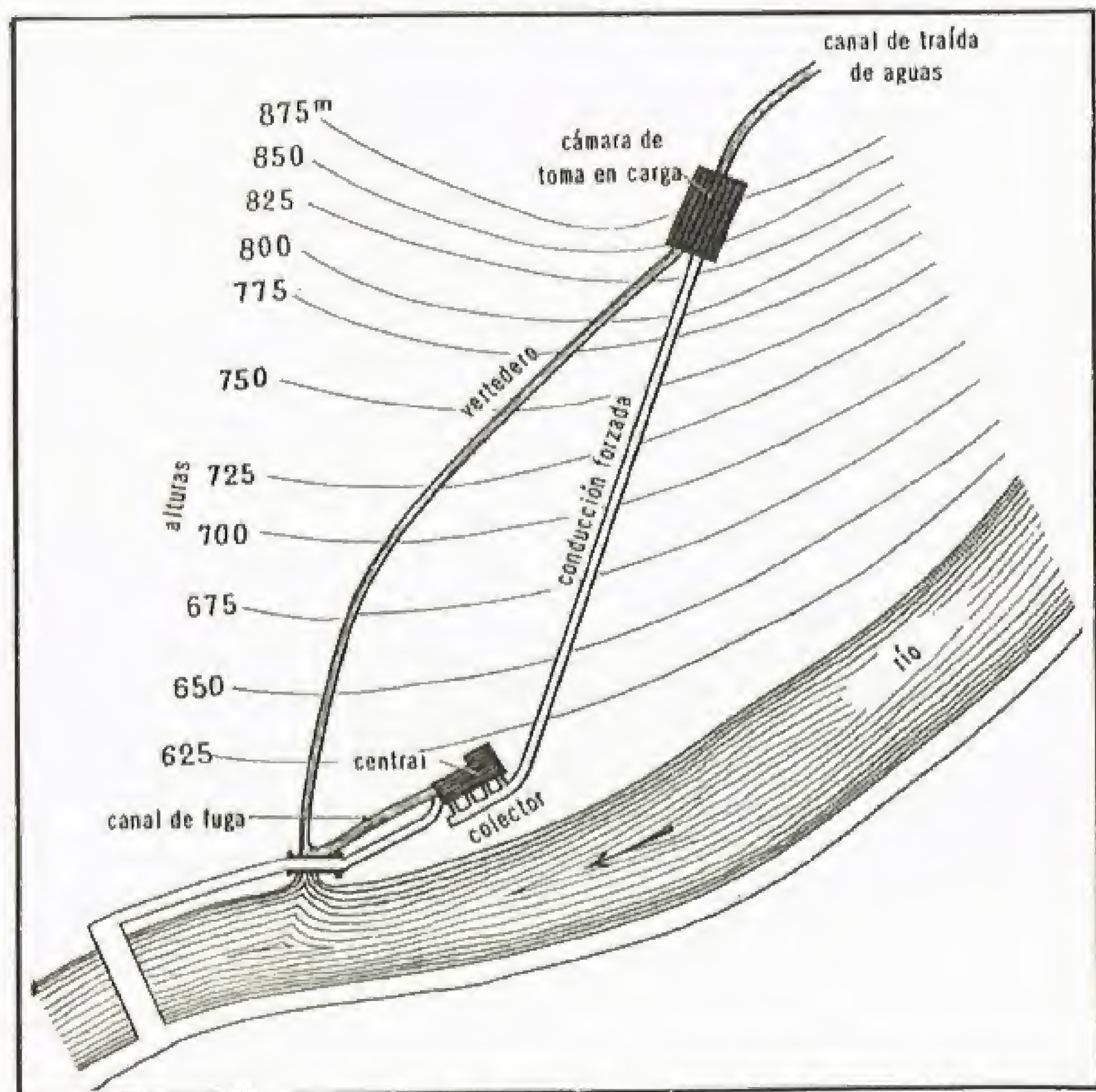


Fig. 613.—Plano de una instalación eléctrica

En la actualidad, las centrales eléctricas están asociadas entre sí, o bien con centrales térmicas. Las centrales térmicas deben funcionar con régimen constante, y las centrales hidráulicas deben cubrir los máximos de consumo.

Conducciones forzadas. — La traída de aguas a las máquinas receptoras, bajo presión, necesita la creación de conductos que puedan

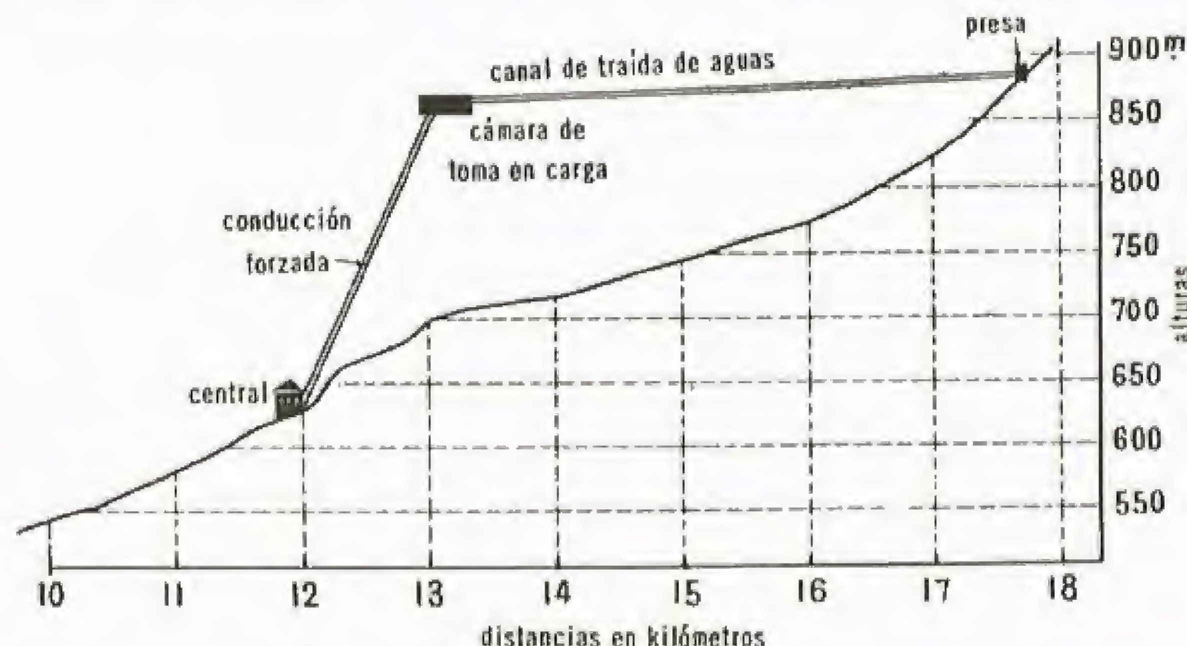


Fig. 614.—Perfil de una instalación hidráulica

soportar cargas muy fuertes (v. *fig.* 613). Se utilizan dos materiales principales: el acero, para las fuertes presiones y casi todos los diámetros, y el hormigón armado, para las bajas presiones y los diámetros mayores.

Energía térmica

Se desconocen las temperaturas exactas que reinan en el seno de la Tierra, aunque se supone que deben ser muy elevadas. Se sabe además que la temperatura aumenta regularmente 1° C por cada 31 m de profundidad (es el grado geotérmico), al menos en la corteza terrestre explorada. La energía térmica total que contiene el planeta es, pues, fabulosa, y la idea de utilizar una parte de ella surgió naturalmente.

Teóricamente, el problema es sencillo: toda máquina térmica clásica consta de una fuente de calor y de una fuente fría. Se tomaría como fuente cálida una cavidad o una caldera situada a gran profundidad, y como fuente fría el agua de un río.

Si la caldera se encontrara a 5 ó 6 km de la superficie (a esta profundidad los sondeos son posibles), su temperatura sería del orden de 160° C a 180° C, y se obtendría vapor a 12 ó 15 kg de presión, o sea perfectamente adecuado para alimentar una central eléctrica.

La cantidad de calorías así recuperadas no dependería más que del caudal del curso de agua, al que sería proporcional. Bastaría con conducir este caudal por las profundidades del subsuelo, hasta la caldera natural, y quizá al hacerlo se encontrarían otros ríos subterráneos que vendrían a añadirse a ese caudal de aguas superficiales.

Todo esto no tiene nada de utópico... Además, la energía térmica o *hulla roja*, como también se ha denominado, se viene ya utilizando. Todo el mundo conoce las aguas sulfurosas de ciertas estaciones termales, que salen a la superficie a temperaturas relativamente elevadas.

Las investigaciones en este dominio no se han emprendido todavía seriamente, salvo los trabajos ejecutados en las proximidades de los volcanes italianos, utilizados hoy por la industria eléctrica italiana, pero no cabe duda que serían productivas y que el día que se organicen metódicamente se pondrá a disposición de la humanidad una nueva fuente de energía casi inagotable.

Albert Metadier

Los ferrocarriles

Reseña histórica. La vía. Instalaciones fijas de tracción eléctrica. Accesorios de la vía. Las estaciones. Señalización y seguridad. Locomotoras de vapor. Locomotoras y automotoras eléctricas. Tracción con motores térmicos. El material rodante. Los trenes. Los frenos

Reseña histórica. — El ferrocarril nació al aplicarse la tracción mecánica a la vía férrea. La idea de hacer circular los vehículos sobre vías, primero de madera y después de metal, para disminuir el frotamiento, había ya tenido aplicaciones, principalmente en las minas, con la tracción animal; pero los ferrocarriles sólo llegaron a convertirse en un medio de transporte práctico y poderoso con el advenimiento de la locomotora de vapor, cuyas primeras construcciones viables aparecieron casi simultáneamente (1829): en Inglaterra con la *Rocket (el Cohete)*, de George Stephenson, y en Francia con la locomotora de Marc Séguin. Los órganos esenciales de la locomotora fueron, desde el primer momento, los mismos que hoy conocemos; en particular el tiro, asegurado por el escape del vapor (invención de Stephenson), y la caldera, del tipo de tubos de humo (invención de Séguin).

La influencia del ferrocarril ha sido considerable: basta con recordar que fue un factor esencial de la unificación de Alemania y el instrumento más potente para la explotación del continente norteamericano. En Inglaterra, las vías férreas se extendieron rápidamente, favorecidas por la abundancia de carbón. En Francia sus comienzos fueron más lentos: en 1842 se creó el plan para una red que constituye todavía la armazón de la actual Sociedad Nacional de Ferrocarriles Franceses.

Si el ferrocarril ha desempeñado una función de primer orden en la vida económica y social de todos los pueblos, ello se ha debido a que, mientras las líneas se desarrollaban, las vías, las instalaciones de seguridad y el material móvil y motor eran constante objeto de perfeccionamientos. Con prodigiosa habilidad, los ingenieros han aprovechado todos los descubrimientos científicos y todos los refinamientos técnicos para poder aumentar las velocidades, las cargas y la seguridad. ¡Qué modesta parece actualmente la realización de la *Rocket*: remolcar cuarenta toneladas a 25 km/h! ¡Cuál no sería el asombro de los ferroviarios de los primeros tiempos si pudieran contemplar las aglomeraciones que se producen hoy a ciertas horas en las estaciones importantes! ¿Habrían podido imaginar los más ardientes partidarios del ferrocarril en su primera época que ciento veinte años más tarde la red ferroviaria mundial alcanzaría una extensión de 1 300 000 kilómetros, llegando hasta los trópicos, hasta Alaska y Laponia, franqueando montañas de 4 800 m de altura o atravesando túneles de más de 20 km de longitud?

A pesar de sus detractores, el ferrocarril no ha acabado de sorprender por su potencia y su velocidad. Aunque la locomotora de vapor tiende a desaparecer, los motores térmicos y eléctricos han encontrado en los ferrocarriles un campo de aplicación bastante fecundo. Las naciones más adelantadas han emprendido la electrificación de sus líneas férreas y, sin darse por satisfechas con esa labor, han abordado también el problema, considerado insoluble, de la tracción eléctrica a la frecuencia industrial. Hoy día, las locomotoras Diesel sustituyen progresivamente las máquinas de vapor, llamadas a desaparecer, en todas las líneas que no se consideran adecuadas para la tracción eléctrica.

La vía. — La construcción de la vía exige considerables trabajos de ingeniería civil, porque las pendientes no deben ser muy acusadas —200 mm/m se considera ya como una pendiente excesiva— y las curvas poco pronunciadas; de ahí las numerosas construcciones —puentes, viaductos, túneles— características de los ferrocarriles. Las líneas de vía estrecha —un metro, por lo general— permiten curvaturas más acentuadas que las líneas de vía normal 1,435 m) y de vía ancha (España: 1,672 m; U.R.S.S.: 1,524 m, etc.). La vía reposa sobre una plataforma de 5,6 m de anchura, en vía única, y de 9,15 m en doble vía, con una entrevía de, aproximadamente, 2 m. Está formada por dos filas de carriles colocados sobre traviesas, generalmente de madera, que reposan a su vez sobre una capa de balasto, de gravilla o de escoria de alto horno, de 30 a 50 cm de espesor. Los raíles o carriles son del tipo llamado de patín plano (el de doble cabeza tiende a desaparecer), de acero laminado, con un peso que puede llegar, o incluso sobrepasar, los 50 kg, y una longitud de 18 m; están unidos por medio de juntas sujetas con pernos, y fijados a las traviesas por tirafondos. Se colocan con una inclinación de 1/20 hacia el interior de la vía, inclinación que corresponde a la conicidad de los calces. En las curvas, la vía presenta con frecuencia un ligero sobreancho (hasta 1,465 m), sobreelevándose además más o menos, según la curvatura, el rail exterior, a fin de atenuar los efectos de la fuerza centrífuga. Las partes rectas de la vía se enlazan con las partes curvas mediante empalmes, que se insertan entre ambas, de curvatura progresivamente creciente (empalme parabólico).

El continuo aumento de cargas y velocidades ha obligado primeramente a reforzar los diversos elementos de la vía, sin modificar su estructura general: carriles más pesados, de aceros más resistentes, traviesas menos espaciadas, capa de balasto más espesa. Los técnicos se orientan actualmente hacia soluciones más audaces: carriles largos, soldados, de varios centenares de metros de longitud, y traviesas de hormigón armado o de hormigón pretensado con juntas de dilatación, sujeciones de tipo especial e interposición de suelas de caucho entre el carril y la traviesa para evitar que las vibraciones desagreguen el hormigón. Con estas medidas se tiende a la conservación del material, a que disminuya la resistencia al rodamiento y a obtener una apreciable reducción de los gastos de mantenimiento.

La conservación de las vías es una de las principales fuentes de gastos de los ferrocarriles. Las sujeciones de los carriles se aflojan con el tiempo, el balasto se deteriora, las extremidades de los carriles se aplastan y la vía corre peligro de deformarse, por lo que es objeto de constante vigilancia y revisiones frecuentes, entre ellas las reparaciones destinadas a subsanar los defectos localizados. Uno de los más frecuentes es la irregularidad de la nivelación, debida al amontonamiento desigual del balasto bajo las traviesas. Una de las formas de remediarlo, que se utiliza, por ejemplo, en Francia, es el procedimiento llamado de "insuflación medida", consistente en depositar bajo la traviesa una cantidad de gravilla fina, calculada para restablecer la nivelación. La mayor parte de los trabajos de mantenimiento están mecanizados, y cuando no bastan los trabajos de reparación se procede a una renovación total de la vía: el conjunto de las operaciones necesarias —arrancar la vía vieja y colocar la nueva, evacuación de los detritus, colocación de nuevos materiales, etc.— se ejecutan por medio de máquinas y de potentes aparatos que permiten un progreso rápido (700 m por día aproximadamente), con el mínimo de molestias para la circulación.

Instalaciones fijas de tracción eléctrica. — Las velocidades que alcanzan los ferrocarriles no permiten contentarse cuando se trata de tracción eléctrica con el simple cable tendido que transmite la energía a los tranvías: el cable de contacto debe ocupar en los ferrocarriles una posición casi invariable sobre la vía, y de ahí la aparente complicación de su suspensión a un cable portador, al cual está ligado por medio de péndulos, de dispositivos de tensión destinados a compensar las variaciones de temperatura, etc. Esta suspensión, llamada de *catenaria*, es, evidentemente, pesada, y exige sólidos soportes (pilones metálicos o de hormigón, pórticos). La corriente es proporcionada por subestaciones distribuidas a lo largo de la línea, alimentadas a su vez por centrales hidráulicas pertenecientes al ferrocarril, o por las líneas de transporte de la red general. Las líneas de cercanías ya electrificadas en épocas anteriores se alimentan con una corriente de débil tensión (600 V), por medio de un carril especial de toma de corriente paralelo a la vía.

Las grandes líneas electrificadas suelen utilizar corriente continua a la tensión de 1 500 voltios, tensión que puede variar según los países. Este sistema ha justificado plenamente las esperanzas de sus promotores, aunque presenta el inconveniente de que requiere numerosas subestaciones —cada 10 ó 20 kilómetros— y catenarias muy pesadas. Para reducir los gastos de instalación, las empresas se han orientado hacia la aplicación directa de la corriente industrial de 50 períodos a las vías férreas: la alimentación del cable de contacto bajo la tensión de 25 000 voltios permite a la vez aliviar las catenarias y sus soportes y espaciar considerablemente las subestaciones (cada 60 km, aproximadamente).

Accesorios de la vía. — El mecanismo más sencillo para enlazar dos vías suele denominarse cambio de agujas, debido al nombre de una de sus componentes: consta de un sistema de agujas y de un cruce unidos por raíles en curva más o menos pronunciada, según la forma y la abertura del aparato. El sistema está formado por dos agujas elásticas solidarias que oscilan alrededor de su talón, entre dos contraagujas, para dar acceso a una u otra vía. Es accionado por medio de una palanca, o también, en las grandes instalaciones, desde un puesto alejado, por medio de una transmisión mecánica o, lo que es más general en la actualidad, por dispositivos eléctricos. Aparatos de control y de fijación permiten bloquear las agujas en su posición, garantizando así al funcionario encargado del cambio de su perfecto funcionamiento.

Los restantes sistemas accesorios consisten en combinaciones de dos o más empalmes y en secciones de vía intermedias; son, por ejemplo, la unión simple, que permite la comunicación de dos vías paralelas, la unión doble o tirante, la travesía-unión (sencilla o doble), que combina el cruce a nivel de dos vías y el enlace entre ambas. Estos sistemas permiten realizar todos los tipos de bifurcaciones. Conviene señalar que los cruces a nivel se sustituyen siempre que se puede por pasos de diferente nivel que permiten prescindir de los riesgos propios de las vías que se cruzan.

Los restantes accesorios de la vía se utilizan cada vez menos y, prácticamente, sólo se han conservado los puentes giratorios para los virajes de las locomotoras en los depósitos.

Las estaciones. — Las localidades situadas a lo largo del trayecto están servidas por estaciones; cuando el tráfico lo justifica, se reservan para la conservación de mercancías instalaciones especiales, enlazadas a las vías principales —las de circulación de los trenes— por una vía de servicio, y completamente separadas de las estaciones de viajeros. En estas últimas hay andenes de 150 a 450 m de longitud y de 3 a 7 m de anchura, con un abrigo para los viajeros, que suele ser una marquesina o también, en algunas grandes estaciones, un hall. A estos andenes se accede, ya a nivel , ya, en las estaciones importantes de tráfico intenso, por pasarelas o pasos subterráneos. En el edificio destinado a los viajeros se encuentran los diferentes servicios de la estación: oficinas, despachos de billetes, registro y entrega de equipajes, salas de espera, bares. Las disposiciones de detalle varían, evidentemente, según el tráfico de la estación, su situación —estaciones de paso, o de otro tipo— y su forma —a nivel o de pisos—; análogamente, también varía el equipo de los diversos servicios. En las grandes estaciones, por ejemplo, se utilizan máquinas para imprimir los

billetes, tractores para el traslado de equipajes, etc. En las grandes estaciones terminales hay instalaciones destinadas a la reparación y el lavado de los trenes. Las estaciones de mercancías presentan la misma variedad, desde la pequeña instalación con una corta vía de descarga y un muelle de unos cuantos metros, parcialmente cubierto, hasta las grandes estaciones con numerosas vías y grandes espacios cubiertos. Algunas de estas estaciones están enteramente especializadas: estaciones lecheras, estaciones-mercado, estaciones destinadas a enlazar con los mataderos, frigoríficos, depósitos de vinos, etc. Diferentes aparatos de conservación y de suspensión, así como diversas básculas y gálibos que permiten verificar los pesos y las dimensiones de los cargamentos, completan el equipo de la estación.

Las estaciones de transbordo y de clasificación se destinan exclusivamente, con independencia de las instalaciones anteriores destinadas al público, a la distribución de las mercancías expedidas. Las mercancías, que por lo general no pueden cargarse en el punto de partida en un vagón que vaya al lugar de destino, se transbordan a depósitos especiales para evitar los retrasos y limitar los gastos; vagones regulares enlazan estas estaciones, con arreglo a horarios establecidos de antemano y a un programa que se revisa constantemente en función del tráfico, a fin de poder reducir al mínimo el número de transbordos. Por las mismas razones, la mayoría de los vagones deben encaminarse desde el punto de partida al de destino en varios trenes sucesivos, pasando por una estación de clasificación; en esta estación son visitados los trenes, que se encuentran en una de las vías del haz de llegada, y se desenganchan los vagones que no vayan al mismo destino. Una máquina les hace retroceder después, lentamente, hacia un segundo haz de vías, llamado de *desconexión*, y pasa por una plataforma de distribución de la cual descienden sucesivamente los vagones, por la acción de la gravedad, hacia las vías a que están destinados; son entonces agrupados de nuevo en otro haz, llamado de *formación*, en el que se componen los trenes que parten a su destino definitivo o hacia otra estación de clasificación. Las instalaciones de las estaciones de clasificación han dado lugar, por la cantidad de elementos que contienen, a largos y minuciosos estudios sobre la forma de los haces de vías, altura y perfil de los de clasificación, enlaces entre los diferentes talleres; en estas instalaciones hay puestos automáticos de agujas que permiten maniobrarlas rápidamente entre dos vagones sucesivos, y aparatos especiales de frenado que situados al principio de los haces de vías tienen como objeto regular el espaciamiento de los vagones, así como dejarles sólo el impulso necesario para poder acoplarse sin daño al último vagón que se encuentre detenido en la vía a la cual se dirigen. Ciertas estaciones modernas de esta clase permiten clasificar más de 4 000 vagones por día.



Puesto de maniobra de agujas de la estación de Montereau (Francia). Pupitre de mando y cuadro de control óptico (*Doc. S. N. C. F.*)

Señalización y seguridad. — Las señales son el medio de correspondencia entre el personal de las estaciones y el de los trenes en marcha; son acústicas —silbidos y petardos— u ópticas; señales de cola de los trenes, señales de la vía. Las señales de la vía, que los maquinistas deben obedecer inmediatamente, sirven para regular el espaciamiento de los trenes en plena vía —semáforos— o para proteger las agujas (cuadros); los primeros autorizan a reanudar la marcha, en ciertas condiciones, una vez marcada la parada, mientras que los segundos imponen la detención absoluta. De noche, el semáforo presenta un disco rojo cuando está cerrado, y el cuadro dos discos rojos; en vía libre, presentan un disco verde. Ambos están precedidos, a un kilómetro de distancia aproximadamente, de una señal de advertencia (un rombo amarillo, o un disco amarillo anaranjado durante la noche) que indica a los conductores que aminoren la marcha para poder detenerse al llegar ante el semáforo o ante el cuadro. Otras señales indican que se disminuya la marcha en ciertos puntos determinados (triángulo amarillo, dos discos amarillos durante la noche). En todas las líneas importantes, estas señales están reemplazadas por paneles-señales luminosos que dan las mismas indicaciones de día que de noche.

Semáforo ferroviario de discos múltiples con «block» automático (*Doc. «Notre métier»*)

La línea está dividida en cantones sucesivos protegidos cada uno de ellos por un semáforo, sistema llamado de cantonamiento o *block-system*, que no permite que haya normalmente más de un tren en cada cantón. El *block* automático se extiende cada vez más; en este sistema, la señal es accionada por aparatos eléctricos desde que el trên entra en el cantón y sólo presenta la indicación "vía libre" cuando el último vehículo ha salido del cantón siguiente.

Para mayor seguridad, una misma persona se encarga de las agujas y de las señales que las protegen, añadiéndose ingeniosos dispositivos destinados a impedir cualquier maniobra intempestiva de una señal o de una aguja.

Estos dispositivos, denominados *enganches*, consistían primitivamente en cerrojos que inmovilizaban la palanca en la posición deseada. Al perfeccionarse las aplicaciones de la electricidad a la señalización, se han podido construir puestos en los cuales todas las operaciones de mando de las señales y de las agujas del itinerario que tiene que seguir el tren, así como el bloqueo en posición de cierre de las restantes señales, y los controles necesarios, pueden efectuarse accionando un simple botón. Desde que el tren abandona la zona de protección, todos los aparatos vuelven a su posición normal. Estos puestos "electrodinámicos" permiten registrar incluso los itinerarios de varios trenes sucesivos; estos itinerarios se realizan después sobre el terreno en el orden en que se han registrado, en cuanto lo permiten las condiciones de seguridad.

La dirección centralizada de la circulación permite regular todos los movimientos desde un puesto único y no solamente en lo que se refiere a una sola estación, sino para toda una línea.

Para facilitar a los maquinistas la observación de las señales, se han instalado sobre las locomotoras aparatos de repetición óptica o acústica. En Francia, por ejemplo, se utiliza un dispositivo eléctrico que se pone en funcionamiento al frotar una escobilla metálica de la locomotora sobre una rampa también metálica colocada junto a la vía, a la derecha de la señal, denominada *cocodrilo*. El dispositivo acciona en la máquina del tren que pasa un silbato especial. En Norteamérica se utiliza, en las líneas muy recargadas, un dispositivo de repetición óptica: pequeñas señales colocadas en la cabina del maquinista que le indican la clase de señales que va a ir encontrando en la vía (cab-señal). Se encuentran actualmente en curso estudios para aumentar la seguridad mediante el frenado automático de los trenes que no se detengan ante una señal cerrada, sobre la teledirección de ciertos trenes y su detección a distancia con aparatos situados a lo largo de la vía, y sobre los posibles incidentes que pueden ocurrir en los trenes (calentamiento de los cubos de los ejes, bloqueo de los frenos, ruptura de los tiros, etcétera).

Locomotoras de vapor. — La locomotora de vapor se compone de una caldera que suministra el vapor a presión, del mecanismo que utiliza este vapor para producir el movimiento y del vehículo que contiene a ambos y transforma la energía desarrollada por el mecanismo en esfuerzo de tracción.

El combustible, que se quema en un hogar situado detrás de la caldera, produce gases que atraviesan el haz tubular, en el cual ceden una parte de sus calorías al agua que lo rodea, y desembocan en la caja de humos, de donde salen al exterior por la chimenea.

El vapor, una vez recogido, es enviado a los cilindros, donde se expande, y después de asegurar el tiro al accionar el escape, sale por la chimenea. El émbolo de cada cilindro arrastra el eje motor por intermedio de la biela motriz; las bielas de acoplamiento enlazan los diferentes ejes motores horizontales. Las ruedas pueden girar gracias a la adherencia de los ejes motores sobre el carril, produciéndose el esfuerzo útil de tracción; este esfuerzo depende, por lo tanto, de la combinación armónica entre la capacidad de vaporización de la caldera, la potencia desarrollada por el mecanismo y el valor del peso adherente, es decir, de la parte del peso de la locomotora que recae sobre los ejes horizontales motores. La locomotora actual es, pues, el resultado de los innumerables perfeccionamientos de detalle de todos sus elementos. El timbre, es decir, la presión de la caldera en servicio, ha pasado de 3,5 kg/cm² en la *Rocket* de Stephenson a aproximadamente 20 kg/cm² en las máquinas actuales. Se han hecho ensayos con calde-

ras a muy alta presión (60 kg/cm²), pero sin consecuencias prácticas.

Una mejora en la utilización del vapor es el *compoundage*, cuya primera aplicación se debe a Mallet (1878). En vez de expansionarse en un solo cilindro, el vapor sufre una primera expansión parcial en un cilindro a alta presión, y después una segunda expansión en otro cilindro a baja presión; este fraccionamiento de la expansión disminuye la diferencia entre las temperaturas de admisión y de escape de cada cilindro y tiende a reducir las pérdidas en la admisión y en el escape del cilindro a baja presión. Este sistema aligera el mecanismo y permite realizar una economía de carbón del 10 al 20%; el sobrecalentamiento, aplicado por primera vez hacia 1900, consiste en aumentar la temperatura del vapor sin elevar su presión, de forma que aumente la diferencia entre las temperaturas en la admisión y en el escape; a tal efecto, se hace pasar el vapor por un "recalentador", formado de pequeños tubos alojados en los tubos superiores, de gran diámetro, del haz tubular, alcanzando así una temperatura de 425°. El sobrecalentamiento reduce las pérdidas de vapor en la admisión y disminuye el consumo de vapor; la economía de carbón que se obtiene con este sistema es del 10%, aproximadamente.

Los dos procedimientos pueden adaptarse a la misma máquina; no obstante, ciertas redes van abandonando este sistema de "compoundage", por considerar que implica mecanismos demasiado delicados.

El calentamiento del agua de alimentación permite recuperar una parte del calor del vapor de escape. El agua penetra en la caldera a una temperatura de cerca de 100°, lo que permite realizar una economía de carbón del orden del 10%. Las aguas utilizadas por las locomotoras son aguas naturales, y las sales minerales que contienen producen incrustaciones en las calderas y reducen rápidamente su porcentaje de vaporización. La supresión de los tartratos que se depositan en las calderas se ha resuelto recientemente con la aplicación del tratamiento integral Armand (T.I.A.).

El hogar, en el que se genera el calor necesario para la producción del vapor, es un recipiente que se monta en el interior de la caja de fuegos, a la que está unido por tirantes y travesaños; actualmente se fabrica en chapa de acero soldado. Una bóveda de ladrillos situada en la parte delantera del hogar mejora la combustión. Diferentes dispositivos (sifones Nicholson, tubos de arco) aceleran la circulación del agua alrededor del hogar y dentro del mismo. Como el aumento de las potencias exige cantidades de calor cada vez mayores, se han aumentado las superficies de las rejillas, desde 0,05 m² (la *Rocket*) hasta aproximadamente 5 m² para la locomotora, por ejemplo, tipo 242 de la Sociedad Nacional de Ferrocarriles Franceses. Las locomotoras americanas tienen superficies de rejillas aún mayores —hasta 17 m²— pero, a partir de 5 m², ya no es posible el calentamiento manual, y el carbón se lleva al hogar por medio de un dispositivo mecánico llamado *stoker*. El calentamiento por mazut se hace con un quemador especial, que permite suprimir la rejilla, pero exige un acondicionamiento especial del hogar. Como el poder calorífico del mazut es mayor que el del carbón, tolera, a igual peso del combustible, recorridos más largos. Al aumentar las superficies de rejilla ha habido que aumentar el diámetro del cuerpo cilíndrico de la caldera, a fin de que la sección de paso de los gases de la combustión sea suficiente. El tiro es asegurado por el vapor que sale de los cilindros, gracias a un órgano especial llamado *escape*, cuyo estudio es muy delicado, ya que hay que obtener un tiro suficiente con un mínimo de contrapresión. En ciertas máquinas potentes, ha sido necesario disponer dos escapes bajo una chimenea doble. En la mayoría de los países se utiliza en la actualidad el escape francés "Kylchap".

El motor es una máquina de vapor horizontal, de dos o tres cilindros en las locomotoras de simple expansión, y de tres o, más generalmente, de cuatro, en las locomotoras "compounds". El vapor es distribuido por los cilindros por correderas, cuyo movimiento es producido desde el eje motor horizontal por un mecanismo llamado *distribución*. Las correderas planas fueron abandonadas desde hace tiempo, siendo reemplazadas por las cilíndricas; las distribuciones por válvulas, a pesar de sus ventajas, ya no son de uso corriente.

Los órganos de producción y de utilización del vapor son sostenidos por un robusto chasis de chapa o de barras, algunas veces incluso monobloque, que descansa a su vez, mediante muelles, sobre las ruedas. Estas últimas tienen de 1,8 a 2,00 m de diámetro, en las locomotoras rápidas, y de 1,35 a 1,55 m en las máquinas de los trenes de mercancías. La adherencia de las ruedas motrices al carril es lo que les permite rodar sin patinar. Esta adherencia es proporcional al peso que soportan las ruedas, llamado *peso adherente*, que limita, por consiguiente, el esfuerzo de tracción que ejerce la máquina, y que debe de ir aparejado con la potencia. Como la carga por eje horizontal está limitada, el peso adherente necesario para transmitir las potencias, cada día mayores, se ha conseguido multiplicando los ejes horizontales motores. Por otra parte, para mejorar la estabilidad en las curvas, se ha añadido, delante y detrás, un pequeño tren rodante con dos ejes horizontales llamado carretón o *bogie*, o con un solo eje horizontal, llamado *bissel*. Estos ejes horizontales son, por lo general, puramente portadores: no obstante, en ciertas locomotoras, el *bogie* de delante del ténder, o el de detrás de la máquina, puede moverse gracias a un pequeño motor denominado *booster*, que sólo se utiliza en el arranque. El número de ejes horizontales motores no puede pasar de ciertos límites, si se quiere que las máquinas se ajusten a las curvas; si la potencia que hay que transmitir requiere mayor número de ejes motores, se recurre a máquinas articuladas de los tipos *Mallet o Garrat*.

Una locomotora puede, pues, caracterizarse por el número y la disposición de sus ejes horizontales motores y portadores. Este número de tipo se completa con frecuencia con un nombre de origen norteamericano: una 231 (tipo *Pacific)* lleva un *bogie* portador en la parte delantera (2), 3 ejes motores (3) y un bisel portador en la parte trasera (1).

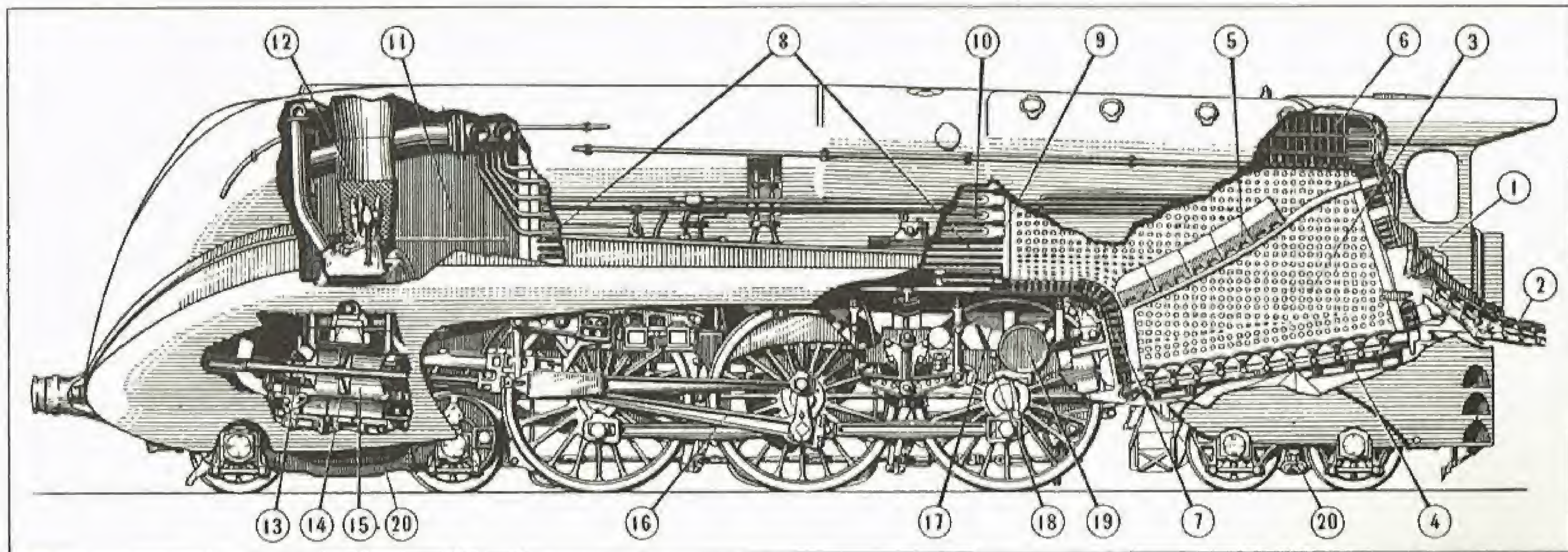
Las cifras que indicamos a continuación ponen de manifiesto los adelantos realizados en un siglo.

La Crampton P.L.M., de 1849, pesaba 30 toneladas; su peso adherente era de 12 toneladas, su timbre, 9 kg por centímetro cuadrado, con una superficie de rejilla de 1,22 m y una potencia de 400 HP. La 242 A1 de la S.N.F.F., pesa 148 toneladas, su peso adherente es de 84 toneladas, su timbre de 20 kg por centímetro cuadrado, su superficie de rejilla 5 metros cuadrados y su potencia 5 000 HP.

Locomotoras y automotoras eléctricas. — La primera locomotora eléctrica circuló en 1895. Aunque depende de una red de distribución de energía, la locomotora eléctrica presenta, a pesar de todo, preciosas ventajas: posibilidad de construir máquinas muy potentes, que ejercen considerables esfuerzos de tracción y permiten arranques rápidos; remolque de trenes pesados de perfil variado sin disminución de velocidad; recuperación de los retrasos y, por tanto, aumento de la velocidad comercial a velocidad máxima igual; mejor utilización de las máquinas a causa de la brevedad de las reparaciones y de la supresión del combustible; aumento del confort de los viajeros. La locomotora eléctrica fatiga menos la vía, a grandes velocidades, que la locomotora de vapor; por último, la electricidad se presta lo mismo a la alimentación de las mayores locomotoras que a la de las pequeñas automotoras, que pueden, además, agruparse a las horas de tráfico máximo.

Las locomotoras eléctricas, como las de vapor, pueden ser de adherencia total o de adherencia parcial. Los ejes horizontales motores se agrupan de dos en dos o de tres en tres para constituir "bogies" motores, o se reúnen en un chasis rígido. En las locomotoras eléctricas, la disposición de los ejes motores se indica con letras: una BB es una máquina de adherencia total con dos *bogies* motores; una 2D2 es una máquina con un *bogie* delante y otro detrás y cuatro ejes motores agrupados en un chasis rígido.

La corriente se capta por medio de frotadores en las electrificaciones dotadas de un tercer carril, y con pantógrafos en el caso de una línea aérea. Los ejes motores suelen ser de transmisión individual: si los motores reposan parcialmente sobre el eje horizontal, lo mueven mediante un engranaje; si están enteramente suspendidos del chasis, el movimiento se efectúa por medio de una transmisión que permite los desplazamientos relativos de la caja y de los ejes. En el compartimento central de la caja se aloja el conjunto de instrumentos que dirige el maquinista desde su cabina, por medio del manipulador y de los diferentes aparatos de mando. En las locomotoras de corriente alterna, alimentadas por



Locomotora de vapor tipo 232 R: 1. Portillo del hogar; 2. Depósito; 3. Hogar; 4. Parrilla; 5. Bóveda; 6. Tirantes de cielo; 7. Travesaños; 8. Caldera tubular; 9. Tubos para el humo; 10. Tubos de recalentamiento; 11. Caja de humos; 12. Escape; 13. Varilla del émbolo; 14. Émbolo; 15. Cilindro; 16. Biela motriz; 17. Muelle de suspensión; 18. Alerones del chasis; 19. Depósito de aire; 20. Carretón o *bogie*

energía de alta tensión, esta última es reducida por un transformador a un valor admisible para los motores.

La variación del esfuerzo y de la velocidad se efectúa, en las máquinas de corriente continua, regulando la tensión en los bornes de los motores, primero eliminando las resistencias y después cambiando el acoplamiento. El esfuerzo puede aumentarse "shuntando" parcialmente los inductores. En las locomotoras de corriente alterna se regula la tensión exclusivamente con el transformador de alimentación.

Las locomotoras eléctricas pueden especializarse en una tarea bien determinada; así, se construyen máquinas de desenganche, capaces de hacer retroceder un tren de mercancías muy pesado a 2 km/h solamente, mientras que las máquinas de velocidad alcanzan hoy día corrientemente 160 km/h.

La mayor parte del parque de locomotoras de los trenes rápidos franceses, por ejemplo, está hoy día integrada por 2D2; las más recientes —construidas para el París-Lyon— pesan 144 toneladas, desarrollan una potencia de 4 800 HP y pueden alcanzar una velocidad de 150 km/h, arrastrando un tren de 950 toneladas; a pesar de ello, la Sociedad Nacional de Ferrocarriles Franceses se orienta hacia la adopción de máquinas de adherencia total, incluso para las grandes velocidades. Las BB de 4 000 HP rinden un servicio análogo al de las 2D2, pesando solamente 80 toneladas. Una CC, un poco más potente (4 300 HP), alcanza corrientemente 160 km/h, arrastrando un tren de 525 toneladas. Las locomotoras para servicios mixtos son BB de 2 800 HP, pesando las más recientes de este tipo 80 toneladas y pueden remolcar, a 105 km/h, un tren de 775 toneladas. En las líneas accidentales se han adoptado máquinas de 4 000 HP con 6 ejes motores (BBB y CC), que pesan 120 toneladas. Las locomotoras de adherencia total, CC y BB, se han revelado perfectamente aptas para las mayores velocidades, y una máquina de cada uno de estos tipos alcanzó la velocidad de 331 km/h en una línea de las Landas, con un tren aerodinámico de tres coches, después de un simple cambio de engranajes (28-29 marzo 1955).

Las locomotoras de corriente monofásica de frecuencia industrial (50 ciclos) representan soluciones completamente nuevas. La S.N.C.F.F., después de haber sometido a ensayos comparativos máquinas con motores directos y convertidores rotatorios, con rectificadores polianódicos y monoanódicos (ignitrones), ha construido varias series de máquinas para sus líneas del Nordeste. Las locomotoras de motores directos, convertidor de frecuencia continua y, sobre todo, de ignitrones, permiten actualmente un servicio comparable al de las máquinas de corriente continua. El problema del arranque, tan difícil para las máquinas de corriente alterna, ha quedado completamente resuelto, y se ha medido un coeficiente de adherencia que alcanza, excepcionalmente, el 49%.

Tracción con motores térmicos. — Desde la aparición de los motores Diesel rápidos, hacia 1930, el ferrocarril ha tratado de sacar partido de sus ventajas y esta forma de tracción ha conocido desde entonces tal éxito, que en los Estados Unidos no se construye, prácticamente, más que este tipo de locomotoras. Este desarrollo vertiginoso obedece no sólo a la abundancia de recursos petrolíferos en América, sino también a las cualidades propias de estas máquinas: rendimiento elevado, incluso con cargas parciales, y, por consiguiente, escaso consumo de combustible, supresión del consumo de agua, y facilidad de aprovisionamiento, incluso durante el trayecto, todo lo cual se ha traducido en la posibilidad de efectuar largos recorridos sin paradas de máxima utilización. Además, su conducción y conservación son relativamente económicas.

El motor Diesel no puede actuar directamente sobre los ejes y es necesario recurrir a una transmisión con desmultiplicación variable; para pequeñas potencias —que llegan hasta 500 ó 600 HP, aproximadamente—, suele adoptarse una transmisión mecánica —engranajes— o una transmisión hidráulica compuesta de un acoplador y de un convertidor de par hidráulico, que se combina frecuentemente con dispositivos mecánicos; para las grandes potencias se recurre a una transmisión eléctrica formada de una generatriz, motores de tracción, y del correspondiente sistema de aparatos que hacen de él un vehículo eléctrico que produce él mismo su corriente. La posibilidad de acoplar varias locomotoras eléctricas y Diesel, y de que puedan ser conducidas por un solo agente, es muy utilizada en Norteamérica para adaptar la potencia de tracción a la carga de los trenes.

Pero las propiedades de los motores Diesel se utilizan sobre todo en los autorraíles. Creados principalmente para luchar contra la competencia del transporte automóvil por carretera, estos vehículos han sido objeto de grandes perfeccionamientos, y en la actualidad efectúan más del 30% de los trayectos de los trenes de viajeros. Además de máquinas pequeñas de 80 a 200 HP con dos ejes, hay máquinas más potentes (200 a 800 HP) con *bogies*, capaces de llevar uno o varios remolques y grandes autorraíles, para comunicaciones rápidas entre grandes centros, que pueden alcanzar una potencia de 1 000 HP y circular a las mayores velocidades. En su construcción se procura principalmente la ligereza. Para ganar espacio, los motores se alojan frecuentemente en los *bogies* o debajo de la caja. La flexibilidad de empleo de este material es acusadísima. Los remolques pueden acoplarse al autorraíl si se quiere, o bien formar con él un elemento automotor indeformable; también se pueden reunir varios de estos elementos para constituir un tren automotor.



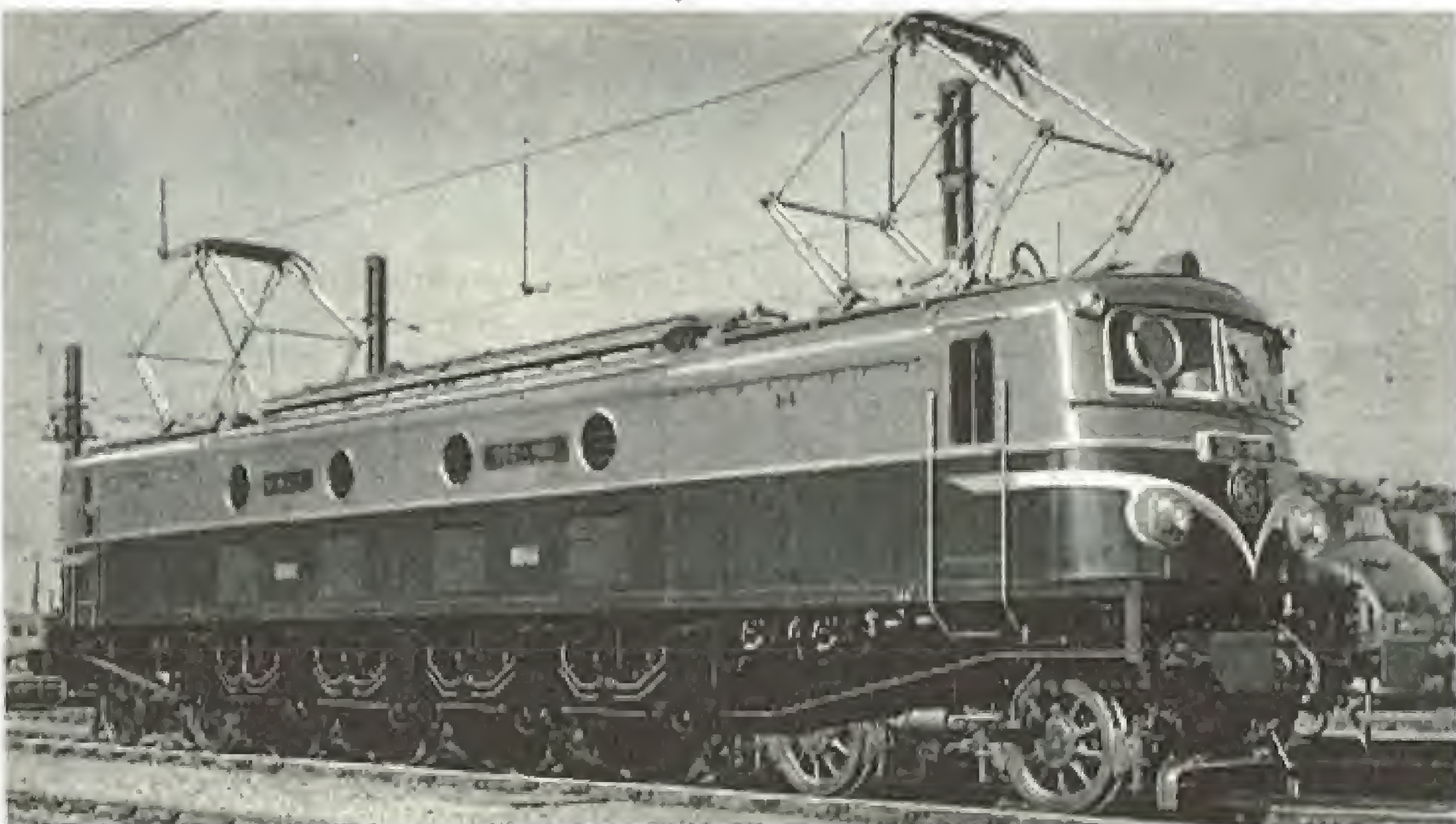
Vagón de mercancías cerrado (*Doc. S. N. C. F.*)

La más reciente de las máquinas de tracción es la locomotora con turbina de gas, que está siendo objeto de una activa experimentación en Europa y en América; su motor es una turbina alimentada por los gases que se producen al arder un combustible en aire comprimido. Su realización ha planteado grandes problemas mecánicos, sobre todo en lo que respecta al compresor, así como metalúrgicos, en relación con la fabricación de los cangilones de las turbinas capaces de resistir las elevadas temperaturas de los gases. Aunque todavía en sus comienzos, este motor ha dado resultados lo bastante alentadores para que sus partidarios lo consideren capaz de destronar a sus rivales; su rendimiento es del mismo orden que el de la locomotora Diesel, pero utiliza combustibles más pesados y, por lo tanto, menos costosos. También se experimenta en los Estados Unidos una locomotora de este tipo, que se calienta con carbón pulverizado. En Francia se encuentra en servicio desde hace varios años una máquina de 1 000 HP con generador de émbolos libres, y otra de 2 000 HP.

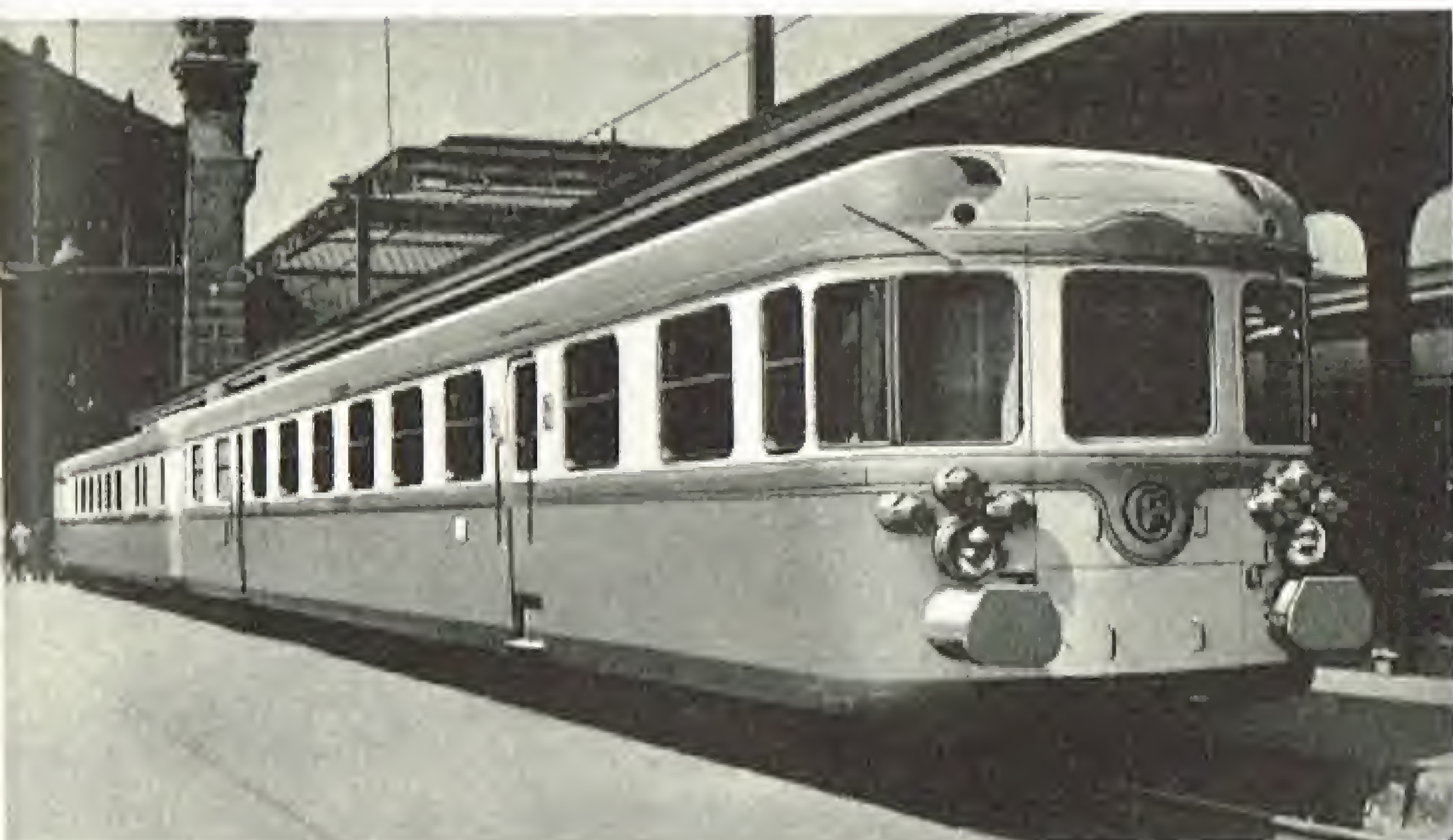
El material rodante. — El elemento fundamental del material móvil de los ferrocarriles es un robusto chasis con tampones elásticos y aparatos de atelaje, que soporta la caja. Este chasis reposa a su vez, a través de muelles, sobre los órganos de rodamiento.

En los vehículos actuales, los órganos de rodamiento son siempre *bogies*, que permiten mayores velocidades. La evolución del material de transporte de viajeros se caracteriza por la carrera hacia una seguridad y un confort cada vez mayores; el aumento de la seguridad se ha obtenido reforzando todos los órganos y adoptando la caja metálica, enteramente soldada y capaz de resistir los choques más violentos. El confort ha sido objeto de los más atentos cuidados en todos los dominios: mejora de las suspensiones, perfeccionamiento de los aparatos de calefacción (a vapor o eléctrica, por convección o por aire expulsado), progreso del alumbrado —eléctrico, por incandescencia o por fluorescencia—, atenciones prestadas a las diversas instalaciones, tales como los tapizados, los pasillos, los lavabos, la intercirculación; la insonorización, la climatización, etc. Los más recientes vagones pesan de 33 a 36 toneladas y pueden transportar, en segunda clase, 80 viajeros sentados. Las dos innovaciones más sensacionales que han aparecido recientemente son: en Francia, los vagones neumáticos (17 t) y, en España, el tren *Talgo*, de concepción absolutamente nueva.

Los vagones de mercancías suelen llevar, por lo general, dos ejes transversales, y transportan de 20 a 30 t: entre ellos pueden citarse los vagones abiertos y los cerrados, que efectúan la mayor parte de los transportes. En su construcción se utiliza cada más el acero, incluso para las cajas de los vagones cubiertos. Además de los vagones de uso



Locomotora eléctrica de corriente continua, tipo 2D2 (*Doc. S. N. C. F.*)



Tren Diesel de los Expresos Trans-Europeos (T. E. E.). (*Doc. S. N. C. F.*)



Vagón de viajeros de tipo norteamericano (*Fot. X.*)

general, las redes ferroviarias han fabricado vagones de tipos especiales para el transporte de determinadas mercancías: vagones abiertos de gran longitud para productos metalúrgicos; vagones-tanques para el transporte de alcohol, gasolina, gasoil y productos químicos; vagones de autodescarga para carbón y minerales; vagones para el transporte de vinos; vagones isotérmicos refrigerantes y frigoríficos para artículos putrescibles. Los "containers", fácilmente transportables del vagón al camión, ofrecen a los clientes que habitan en localidades por donde no pasa el ferrocarril las ventajas del transporte de "puerta a puerta" sin necesidad de cargas y descargas intermedias.

Dada la importancia del parque de vagones, se impone, evidentemente, una regularización de este material lo más acentuada posible; esta necesidad se siente actualmente en todos los países, y las redes ferroviarias europeas, agrupadas en la Unión Internacional de Ferrocarriles, trabaja en común para la fabricación de un mismo tipo de vagones.

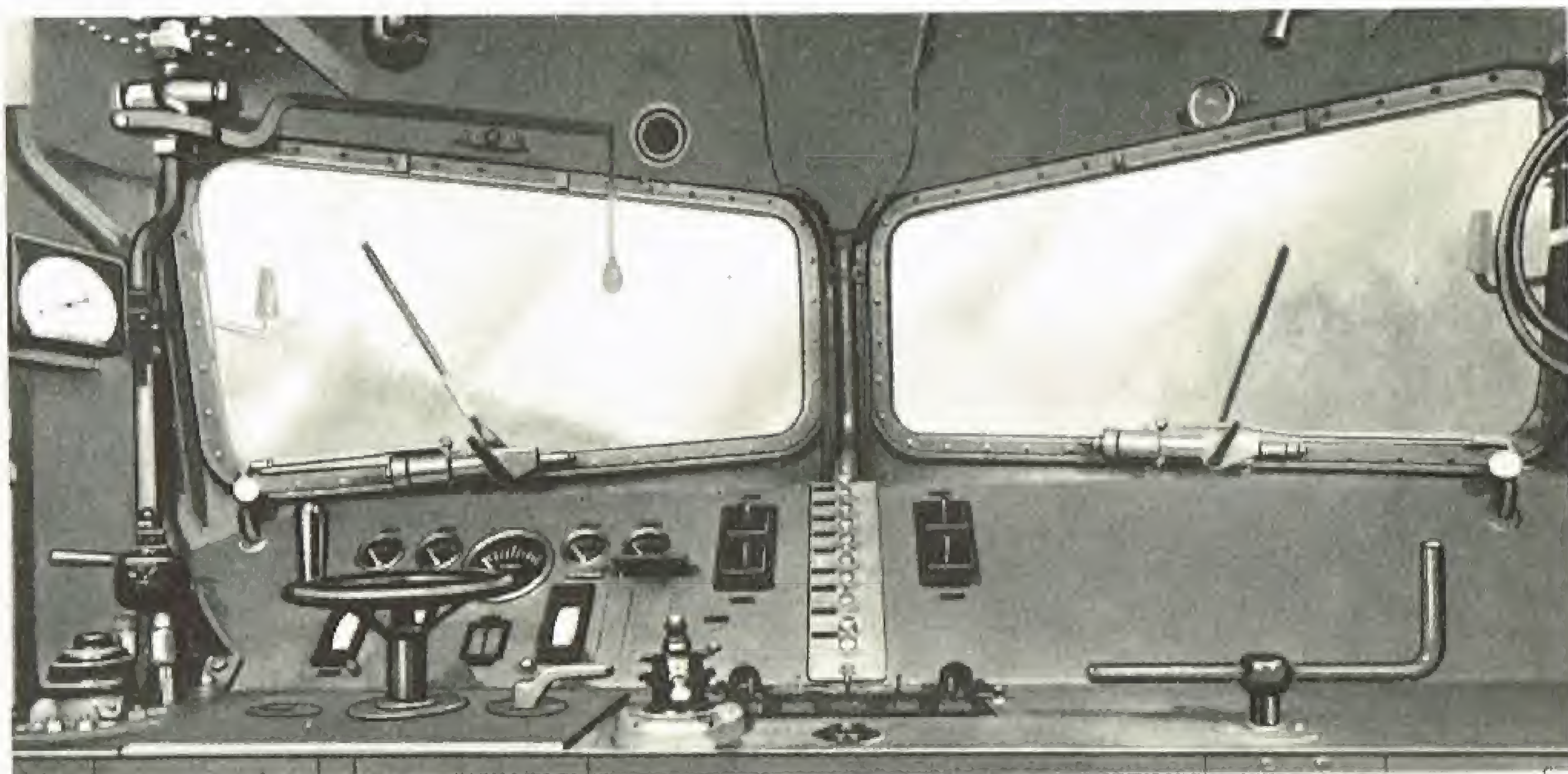


Vagón de viajeros de tipo europeo (*Fot. Schall*)

Los trenes. — Los trenes se clasifican en diversas categorías, según la velocidad y la frecuencia de sus paradas; así, se distinguen trenes de viajeros rápidos, expresos y ómnibus, trenes correos y trenes de mercancías directos y ómnibus. Cuando circulan diariamente o en días determinados, se llaman regulares, y cuando se ha previsto su marcha, pero sólo se emplean en caso de necesidad, facultativos. En épocas de mayor tráfico, trenes suplementarios duplican o triplican los servicios de los trenes regulares. La velocidad de los trenes varía considerablemente, dentro de cada categoría, según las necesidades del servicio y las características de las líneas: la velocidad media de marcha de los rápidos oscila entre 70 y 130 km/h; la de los trenes ómnibus y correos, entre 50 y 80 km/h; la de los trenes de mercancías no llega a superar los 55 km/h. La carga de los trenes está limitada por el esfuerzo de tracción que puede proporcionar la locomotora, por el perfil de la línea y por la resistencia de los atelajes. Su longitud también está limitada: la de los trenes de viajeros depende de la longitud de los andenes (300 a 450 m), y la de los trenes de mercancías de las de las vías de garaje (aproximadamente, 900 m, o sea 80 vagones). La seguridad de la explotación exige al conjunto del personal ferroviario el respeto absoluto de las instrucciones de servicio que reglamentan la marcha de los trenes, su composición y su frenado.

Los frenos. — Los frenos deben permitir al maquinista detener el tren ante los obstáculos y, de una manera general, obedecer a las señales que reducen la marcha. Todos los trenes están hoy día dotados de un freno continuo y automático, merced al cual puede frenarse todo el convoy desde la locomotora y que, además, entra en acción automáticamente en caso de rotura de los atelajes. El freno Westinghouse, de utilización muy extendida, lleva un compresor en la locomotora que envía aire comprimido al conducto general que recorre toda la longitud del tren; cuando el maquinista acciona la palanca del freno, provoca una depresión en dicha conducción, la cual hace funcionar, en todos los vagones provistos de freno, una triple válvula que pone en comunicación un depósito auxiliar lleno de aire comprimido con el cilindro del freno, provocando de esta forma la aplicación de las calzas. Los vehículos de los trenes de viajeros van provistos todos ellos, obligatoriamente, de este tipo de freno; los de los trenes de mercancías también van provistos en una fuerte proporción, que aumenta constantemente, y los restantes sólo lo llevan en la dirección. A causa de la longitud de los trenes, y de la gran diferencia de peso entre los vagones vacíos y los vagones cargados, la aplicación del freno continuo automático a los trenes de mercancías ha planteado arduos problemas, que han exigido la intervención de dispositivos especiales. Otro tipo de freno continuo de aire comprimido, el freno directo, que no es automático, se utiliza a veces como complemento del antes citado. El funcionamiento del freno de aire comprimido puede también ser provocado por electroválvulas, cuya acción, completamente simultánea, evita la reacción entre los vehículos. Por su parte, los frenos de mano no se utilizan más que excepcionalmente, como frenos de socorro. La tendencia actual es hacer que el freno automático sea de aflojamiento regulable, reemplazando la triple válvula por un distribuidor complejo.

René Dugas



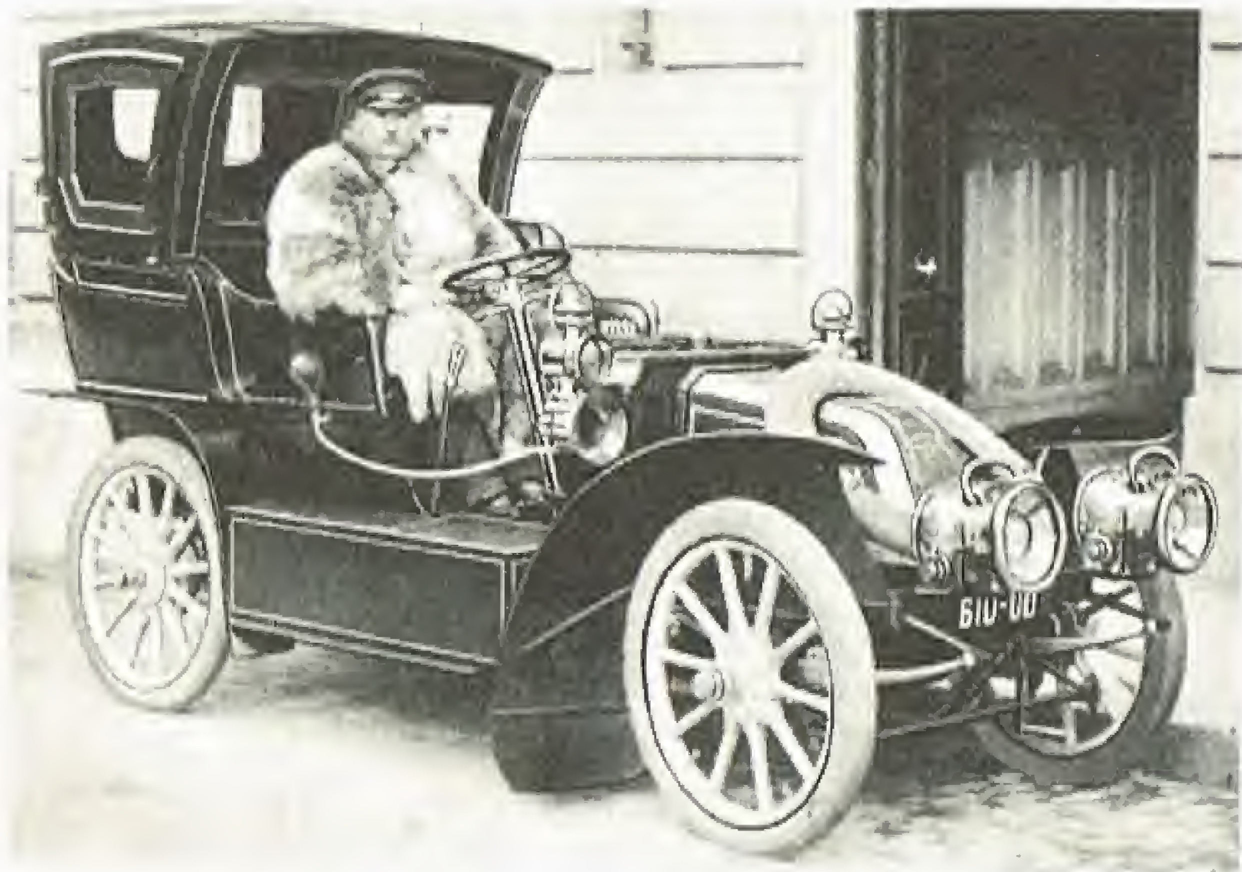
Vista del interior de la cabina de conducción de una locomotora eléctrica tipo 2D2 (*Doc. S. N. C. F.*)

El automóvil

Reseña histórica. Descripción. El motor. El embrague. La caja de velocidades. Perfeccionamientos de las cajas de velocidades. Caja de velocidades con preselección. Caja de velocidades electromagnética. El puente trasero. La rueda libre. La dirección. Frenos. Los servofrenos. Los frenos hidráulicos. La suspensión. Nuevas tendencias del automóvil. Vehículos carenados (o carrocerías llamadas «aerodinámicas»). Ruedas motrices delanteras. Motor trasero. Ruedas motrices traseras

Reseña histórica. — El precursor de los vehículos automóviles es, indudablemente, el de tres ruedas, movido a vapor, que construyó en Francia el ingeniero militar **Cugnot**, en 1764, subvencionado por el ministro Choiseul; un año después construyó un segundo modelo que se conserva en el Conservatorio de Artes y Oficios de París. En Inglaterra, en 1784, James **Watt** patentó un coche movido por una máquina de vapor, que no llegó a construirse. Los ingenieros **Griffith** (1821), **Hill** (1824) y **Hancock** (1831) construyeron diligencias a vapor que efectuaron servicios entre Londres y sus alrededores. El desarrollo de los ferrocarriles, creados por aquella época, obstaculizó el del automóvil a vapor.

En 1873, Amédée **Bollée** construyó la "Mancelle", vehículo de vapor, uno de cuyos modelos, "La Nouvelle", hizo después el trayecto París-Burdeos. En 1883, el marqués *de Dion* construyó un triciclo a vapor; pero la invención del automóvil de petróleo, durante mucho tiempo reivindicada por los alemanes para **Charles Benz,** se debe a Eduardo **Delamare-Deboutteville,** que el 8 de mayo de 1883 construyó el primer vehículo automóvil movido por vapor que ha circulado por una carretera.



Uno de los primeros automóviles: el *Vicart* (1906)

En 1886, **Benz** y **Daimler** construyeron a su vez un vehículo provisto de un motor de explosión.

En 1887, **Daimler** montó un motor de una potencia de 1 caballo y medio en una vagoneta sobre raíles destinada a la tracción; en 1891, **Panhard** y **Levassor** montaron sobre un chasis un motor Daimler de 2 HP. El motor de explosión fue objeto de perfeccionamientos sucesivos por **Peugeot, de Dion-Bouton, Panhard-Levassor, Bollée** y Louis **Renault.** En 1894, el trayecto París-Ruán fue recorrido a la velocidad de 21 km/h; en 1895, se corrió la carrera París-Burdeos ida y vuelta, y el tiempo invertido por el vencedor fue ¡48 horas 48 minutos! Se empezaron después a emplear las bandas neumáticas sobre las ruedas.

Los vehículos de vapor siguieron empleándose todavía durante algún tiempo para los transportes públicos entre las localidades por donde no pasaba el ferrocarril. Se construyeron también algunos coches eléctricos, pero la necesidad de cargar los acumuladores hizo casi imposible su empleo. En 1901, se llegó a una velocidad media de 74 kms por hora en la carrera París-Berlín. En 1903, en la París-Madrid, la media obtenida fue de 105 km/h, y desde entonces, el automóvil ha venido realizando progresos considerables, tanto desde el punto de vista de la velocidad pura como de la resistencia de los vehículos y la economía del combustible.

Descripción. — Un vehículo automóvil de turismo consta, en general, de dos partes: el *chasis,* cuadro o bastidor metálico formado por dos travesaños paralelos de chapas de acero unidos por tirantes, que sostiene los órganos mecánicos, y la *carrocería,* solidaria del chasis, que protege a los viajeros y envuelve el conjunto.

En los coches modernos, el chasis va desapareciendo, siendo substituido por una caja en la cual los elementos de la carrocería forman un bloque lo más rígido posible.

En el chasis están situados los órganos mecánicos más importantes, que son: el motor, el embrague, la caja de velocidades, el puente trasero, la dirección y los frenos.

El motor. — El órgano esencial del automóvil es el motor, generador de la potencia que determina su movimiento. Un motor de automóvil debe reunir las siguientes características: potencia media, con buenas aceleraciones y, sobre todo, escaso consumo de aceite y de gasolina, si está destinado a una clientela media; en ciertos casos muy especiales, en cambio, la economía se sacrifica por completo en beneficio de la potencia. El motor debe ser, además, de poco peso y poco volumen, rápido y silencioso.

En el capítulo Motores (v. pág. 193) se expone el principio del motor del automóvil.

El motor se compone, en general, de un cárter, que sostiene el cigüeñal por medio de soportes, y que contiene los órganos de distribución y de engrase; también soporta los cilindros, a los cuales se adaptan los tubos de admisión de los gases, del escape, y de llegada y salida del agua de refrigeración.

En la actualidad se van substituyendo los cilindros verticales clásicos por cilindros horizontales, opuestos dos a dos *(flat-twin),* principalmente para las pequeñas potencias.

El embrague. — Es el órgano que relaciona el motor con el cambio de velocidades para el arrastre de la transmisión. Es necesario que en todo momento pueda modificarse la desmultiplicación del movimiento entre el motor y las ruedas motrices; la finalidad del embrague es precisamente desconectar el motor de las ruedas motrices, para permitir su puesta en marcha o su parada sin interrumpir el movimiento del motor, o bien para efectuar los cambios de velocidad.

Existen varios tipos de embrague.

1º Mencionaremos, sin extendernos más, el *embrague cónico,* que actualmente no es utilizado.

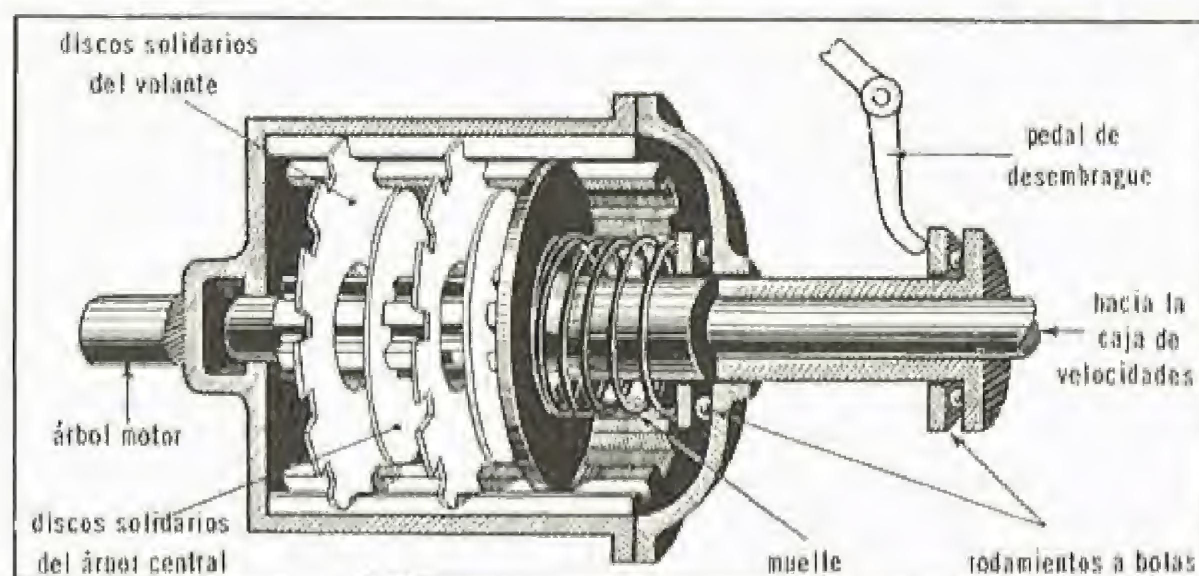


Fig. 615.—Embrague de discos

2º El embrague cónico, demasiado tosco, y que no permite poner gradualmente en marcha el vehículo, ha sido substituido por el *embrague de discos* (v. figura 615), compuesto de discos delgados y lisos, unos solidarios del árbol motor y otros del árbol principal de la caja de velocidades, que se juntan alternativamente. Los discos solidarios del motor llevan una materia de un elevado coeficiente de frotación (Ferodo).

Un potente muelle comprime un platillo contra dicho conjunto y, a causa de esta compresión, los discos del árbol motor arrastran los de la caja de velocidades: es la posición de embrague. En la posición de desembrague, los discos de la caja de velocidades ya no son arrastrados por los del árbol motor, a causa de la acción del pedal de desembrague, que contrarresta el efecto de la compresión del muelle antes citado.

Los constructores, basándose en el mismo principio, fabrican hoy también embragues de disco único. Señalaremos de paso que estos aparatos pueden funcionar en seco o con aceite fluido.

3º Es innegable que los dos sistemas anteriores son, desde el punto de vista mecánico, poco lógicos. Por ello, se ha intentado simplificar el trabajo del conductor suprimiendo el pedal de embrague, lo que se ha conseguido parcialmente con los *embragues* o *acopladores hidráulicos.* En este dispositivo, un rotor motor (la bomba), conectado con el cigüeñal, arrastra, por medio de un fluido (aceite), un rotor receptor (la turbina), que está a su vez ligado al árbol de la caja de velocidades. Los dos rotores van provistos de álabes radiales; cuando el cigüeñal arrastra la bomba en un movimiento de rotación, el aceite que contiene se ve sometido a una fuerza centrífuga que tiende a proyectarlo hacia toda la periferia de la rueda. Éste aceite alcanza entonces los álabes de la turbina y vuelve a la bomba en la que penetra por su parte central.

Así se produce el arrastre progresivo de la turbina y, teóricamente, el conjunto bomba-aceite-turbina se desplaza entonces en un solo bloque; en realidad, se produce siempre un pequeño deslizamiento, tanto más sensible cuanto menos rápidamente gira el motor. A este sistema se adjunta un mecanismo electromagnético que bloquea, por decirlo así, el embrague hidráulico a las velocidades normales.

Los *convertidores de pares* pertenecen a una segunda categoría de acoplamientos hidráulicos; se distinguen de los anteriores porque llevan uno o dos estatores montados en rueda libre sobre el árbol secundario, y una bomba auxiliar montada también en rueda libre sobre el cubo de la rueda principal. Este sistema presenta sobre el anterior la ventaja de que, al permitir que el fluido ataque los álabes por cualquiera de las caras, puede asegurar solo y automáticamente, por ejemplo bajo la influencia de una ascensión, una reducción de velocidad que puede llegar hasta el 2,25/1. Para la marcha lenta del vehículo, se introduce un factor de desmultiplicación suplementaria de 1,81/1, por medio de un tren epicicloidal, que permite asimismo la marcha atrás. En este sistema

(dynaflow), una pequeña manilla situada sobre el volante permite pasar del régimen normal al régimen lento, puesto que el pedal del embrague queda suprimido.

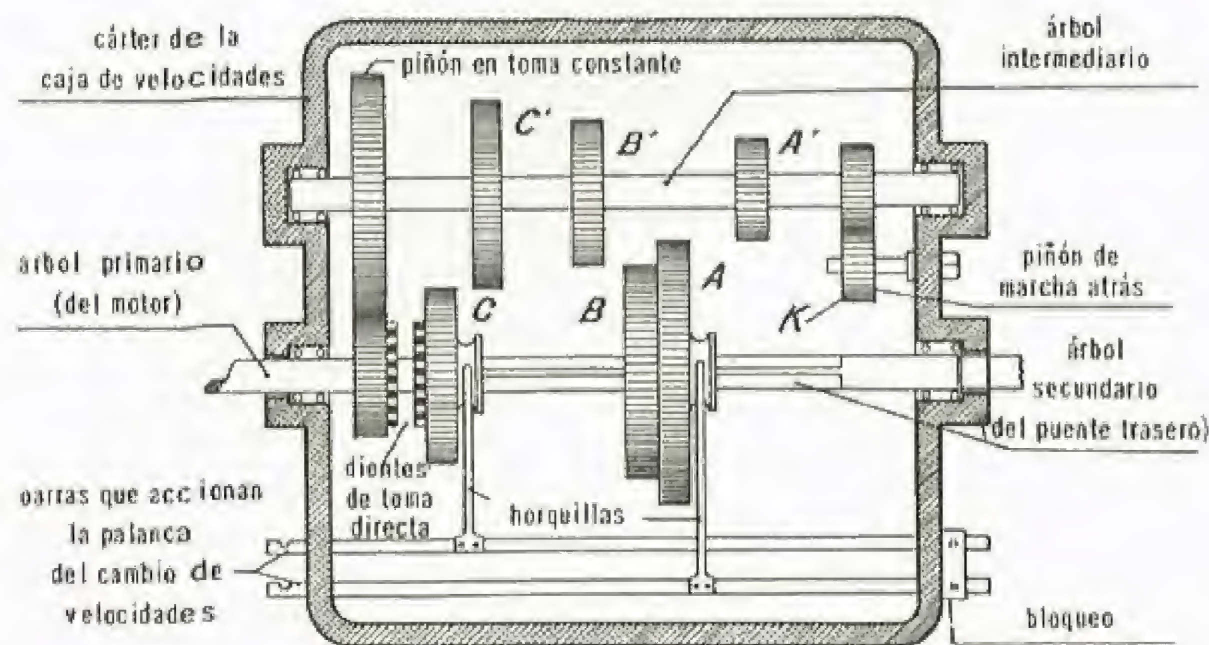


Fig. 616

La caja de velocidades. — Es el órgano que recibe el movimiento de rotación del motor enviándolo después a la transmisión, desmultiplicado en diferentes proporciones, según el perfil de la ruta, o incluso invirtiendo el sentido del movimiento, en la marcha atrás (*fig.* 616).

El cambio de velocidades permite utilizar racionalmente la potencia del motor; para cambiar, se acciona una palanca situada al lado del conductor o debajo del volante de dirección, que desplaza uno o varios trenes de engranajes situados en un árbol, cuyos piñones engranan sucesivamente con los piñones de otro árbol, llamado *árbol intermediario* de la caja.

El árbol primario y el árbol secundario se encuentran uno a continuación del otro, en la prolongación del árbol motor que sale del embrague, pero no son solidarios. Al árbol primario va calado un piñón que está siempre engranado con otro piñón del árbol intermediario, paralelo a los anteriores. En el árbol secundario, acanalado, pueden moverse piñones o trenes de engranaje; estos últimos van engranando sucesivamente con los piñones del árbol intermediario; como estos piñones y estos trenes de engranaje no son todos del mismo diámetro, el movimiento, que pasa del árbol primario al árbol intermediario, y después al árbol secundario, queda, por consiguiente, desmultiplicado. El árbol primario y el árbol secundario pueden hacerse directamente solidarios —toma directa— mediante una combinación especial.

Para la marcha atrás, como los motores de explosión sólo giran en un sentido único, el engranaje A engrana, en el extremo de su recorrido, con un piñón especial que arrastra el árbol secundario en sentido inverso del árbol primario.

Las cajas de velocidades llevan dos o tres trenes de engranajes. Por lo general, son de tres o cuatro velocidades en los acopladores hidráulicos o en el dynaflow (v. anteriormente).

Perfeccionamientos de las cajas de velocidades. — Estos perfeccionamientos se refieren a dos elementos esenciales: el silencio de su funcionamiento y la facilidad del cambio de velocidades.

Uno de los medios más eficaces para obtener un funcionamiento silencioso es el empleo de engranajes helicoidales rectificados. Como estos engranajes tienen que estar siempre en contacto, basta con que éstos puedan ser en algunos momentos no solidarios del árbol al que pertenecen. Este resultado se consigue por medio de dientes permanentemente solidarios del árbol y que, según las circunstancias, son o no solidarios del piñón.

Para hacer más silencioso el cambio de velocidades, se ha perfeccionado este sistema añadiendo un pequeño embrague a cada piñón, y de esta forma el engranaje de los dientes del árbol y el piñón se hace cuando éstos giran a la misma velocidad *(synchromesh)*.

Caja de velocidades con preselección. — Esta caja aumenta la facilidad de conducción del vehículo a costa de su potencia. Cuando se necesita cambiar de velocidad —al aproximarse, por ejemplo, un viraje o una aglomeración—, se acciona una manilla instalada en el árbol de dirección, colocándola en la posición correspondiente a la combinación que se desee adoptar. Una vez que se desembraga a fondo, la combinación preseleccionada se encaja automáticamente, sin que tenga que accionarse ninguna palanca de velocidades.

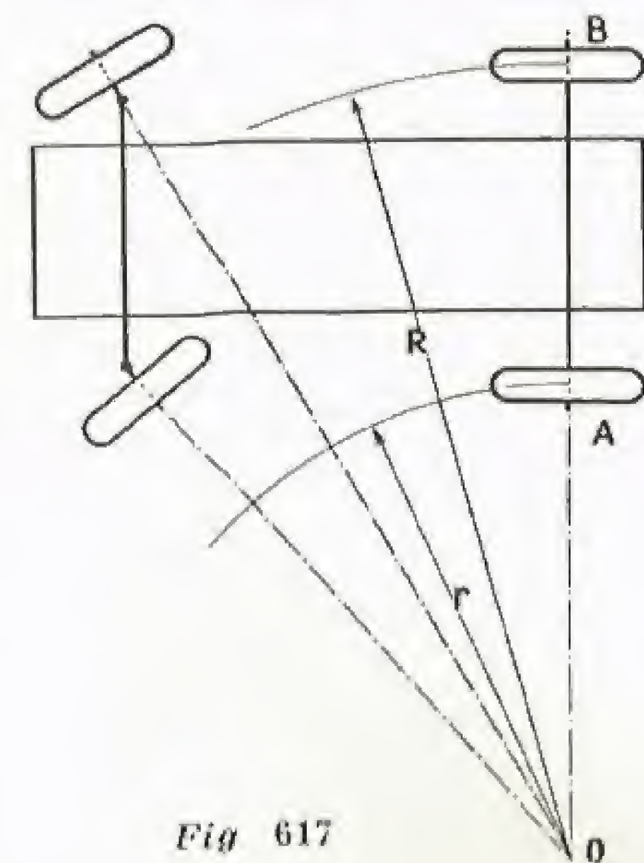


Fig 617

Caja de velocidades electromagnética. — Esta caja, que se funda, como la anterior, en el principio de los engranajes epicicloidales, está concebida de tal forma que los engranajes están en conexión constante; un sistema de frenaje electromagnético de ciertos discos de la caja permite obtener dos desmultiplicaciones diferentes. Las cajas electromagnéticas están montadas con una combinación de dos sistemas idénticos, que permiten cuatro relaciones.

La marcha atrás se obtiene con un inversor de marcha, independiente del dispositivo cuyo detalle se acaba de exponer.

El puente trasero. — Así se llama al conjunto del eje transverso trasero y de los órganos de transmisión que contiene. Este árbol del eje transverso trasero, arrastrado por el árbol de transmisión, hace girar las ruedas traseras que, por lo general, son las únicas motrices.

Para permitir los virajes, este eje está dividido en dos partes, unidas por un *diferencial*.

Para que el vehículo pueda virar, es necesario, a fin de que ninguna de las ruedas patine sobre el suelo, que giren ambas alrededor de un mismo punto, por ejemplo el O (*fig.* 617). La rueda A, que se encuentra en la parte interior de la curva, describe un círculo de radio *r*, menor que el radio R que describe la rueda exterior B; la rueda B tendrá, pues, que recorrer, al virar, un camino mayor que la rueda A; y de ahí la imposibilidad de que ambas ruedas A y B estén unidas por un mismo árbol. El diferencial, que está dispuesto entre los árboles que mueven las dos ruedas traseras, es el órgano que permite que éstas giren en las curvas a velocidades diferentes sin patinar, y conservando su carácter de ruedas motrices.

El diferencial (*fig.* 618) es una gran corona dentada A, a la que imprime su movimiento de rotación el árbol B, conectado con el motor; esta corona arrastra los ejes de los piñones satélites C, C. En marcha normal, estos satélites no giran sobre ellos mismos, sino que hacen girar los piñones D y E, conectados a las dos ruedas F y G por dos árboles independientes, que forman, cada uno de ellos, la mitad del eje transversal trasero; las dos ruedas giran, por lo tanto, a la misma velocidad, pero al tomar una curva, la rueda F, que se encuentra en el interior del mismo, pivota, mientras que la otra rueda G describe la parte exterior del viraje; entonces frena su piñón E, que al ofrecer una resistencia a la acción de los satélites les hace girar sobre ellos mismos. Estos satélites arrastran entonces el piñón D más rápidamente que el piñón E; la rueda G gira, pues, más rápidamente que la rueda F y puede describir la circunferencia exterior del viraje rodando sin verse obligada a deslizarse sobre el suelo, con perjuicio de los neumáticos y del mecanismo. La relación de desmultiplicación del punto entre el piñón de ataque y la corona del diferencial es fija en cada vehículo, y depende de su tipo: camioneta, vehículo de ciudad, vehículo de carretera, etc.

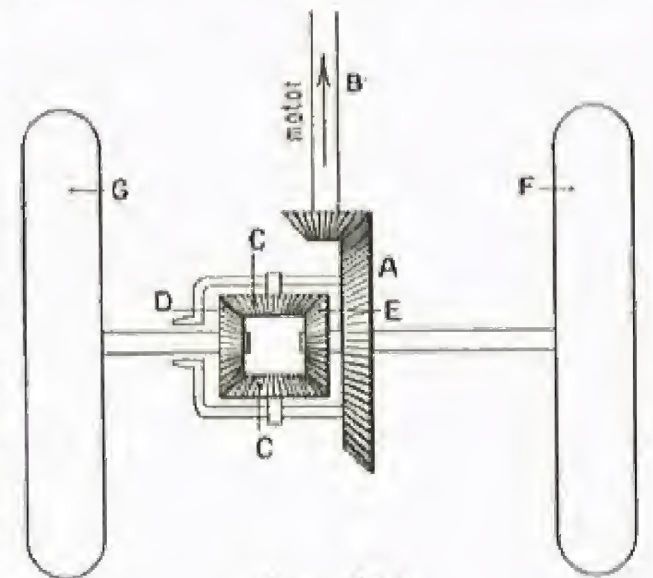


Fig. 618

La rueda libre. — Algunos constructores han tratado de reducir el consumo mediante un sistema de rueda libre análogo al de las bicicletas. Los mecanismos empleados están en general constituidos por dos cubetas, una solidaria del árbol motor y la otra de la transmisión, que comprenden entre ellas, dentro de alvéolos en forma de rampas, rodillos que se obturan cuando el motor gira más rápidamente que la transmisión y producen, por consiguiente, el arrastre. Cuando se afloja el acelerador o cuando el vehículo, al descender por una cuesta, rueda a una velocidad superior a la que corresponde al régimen del motor, los rodillos ya no están obturados y las cubetas quedan libres. Este dispositivo, que ha originado varios accidentes, está prácticamente abandonado.

La dirección. — El vehículo se dirige moviendo las ruedas delanteras, que van montadas, en husos articulados, a las extremidades del eje transversal delantero. El conductor, por medio del volante y del mecanismo de la caja de dirección, hace pivotar una de las ruedas, que arrastra la simétrica por medio de la barra de acoplamiento.

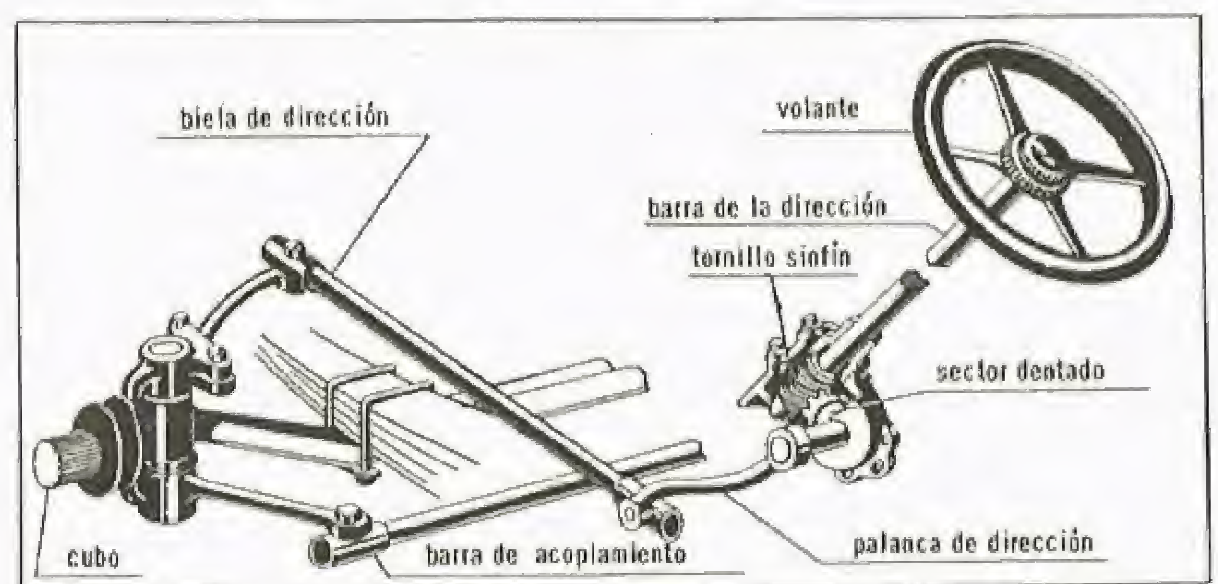


Fig. 619

La dirección debe ser *irreversible*, y los choques o irregularidades de la carretera no deben influir sobre ella, sino únicamente la acción del conductor; también debe ser suave, es decir, que sólo exija del conductor, que frecuentemente se encuentra obligado a accionarla con una sola mano, un esfuerzo mínimo.

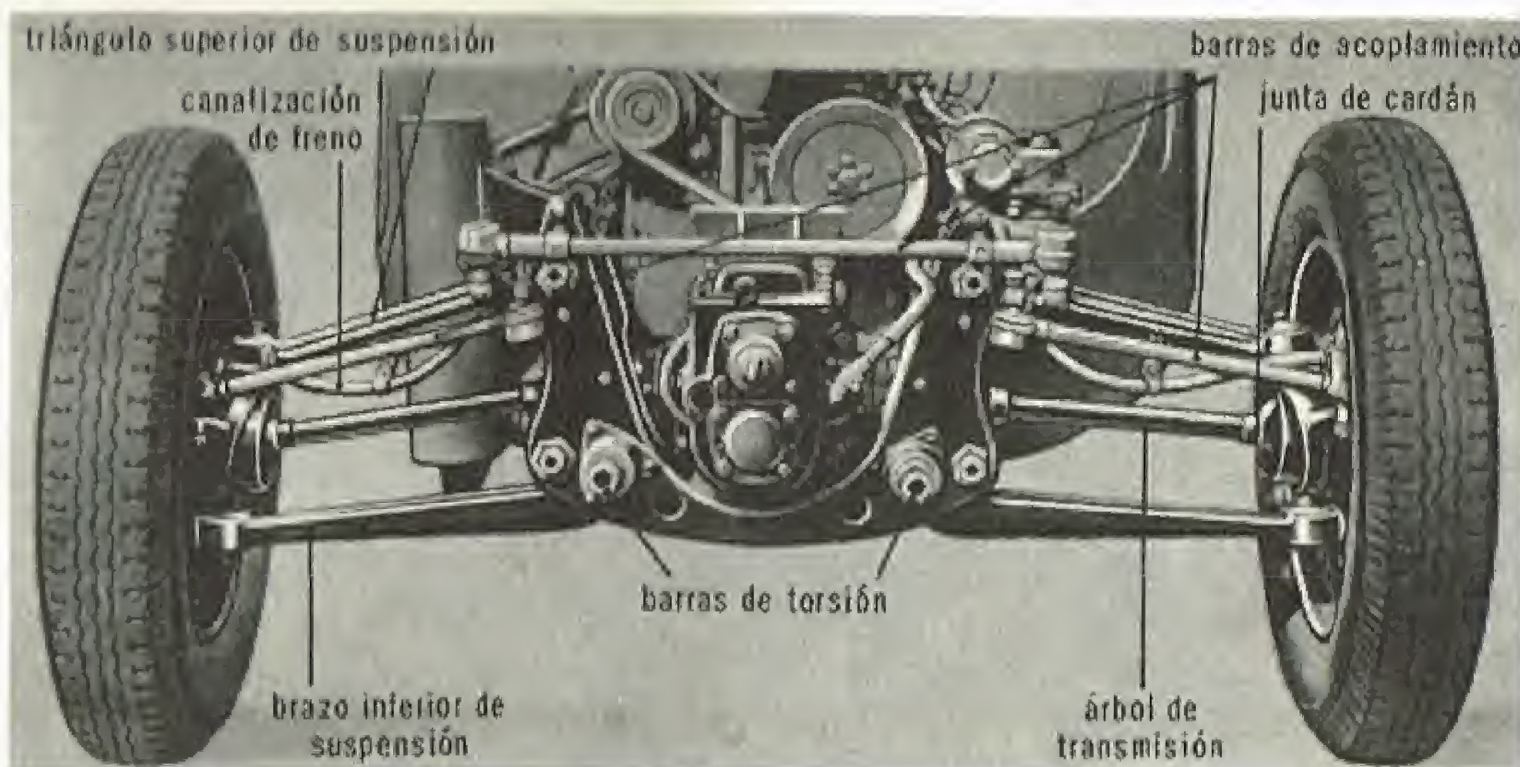
El conjunto de una dirección (*fig.* 619) lo integran un volante y un árbol de dirección, que lleva el volante en una de sus extremidades y un tornillo sin fin en la otra, que engrana con un sector dentado sobre cuyo eje está fijada la palanca de mando de la dirección; esta palanca hace que se mueva una de las ruedas por medio de la biela de la dirección y de la palanca de ataque del huso del eje transversal. Las dos ruedas están acopladas por medio de una barra, llamada barra de acopla-

miento, que se articula, a través de dos ejes verticales, a dos palancas solidarias de ambas ruedas.

La dirección está desmultiplicada y, por lo general, hay que girar más el volante cuanto más pesado y menos rápido es el vehículo.

En las curvas, las dos ruedas delanteras deben girar alrededor de un mismo punto, que es el centro instantáneo de rotación. Este resultado se obtiene siempre que las palancas y la barra de acoplamiento cumplan la siguiente condición: las dos líneas que unen los ejes de los pivotes de los ejes transversales con los ejes de la barra de acoplamiento, deben encontrarse, en un plano, sobre el eje transversal trasero (v. *fig.* 617).

Los ángulos máximos que pueden girar las ruedas en un sentido u otro con respecto a su posición en línea recta se llaman *ángulos de giro*, y el radio del círculo mínimo que puede describir la rueda exterior del vehículo, *radio de giro;* cuanto menor es éste, más fácil de manejar es el vehículo, por lo que conviene aumentar los ángulos de giro.



Suspensión por barras de torsión de un automóvil de tracción delantera

La biela de dirección, articulada generalmente sobre la rótula, está provista de muelles amortiguadores que absorben los choques debidos a desigualdades o estado de la carretera.

La dirección suele llevar órganos auxiliares: claxon, encendido de los faros, etc.

Frenos. — Los frenos, cuyo objeto es detener el vehículo o aminorar su velocidad, deben actuar progresivamente.

Los automóviles deben ir provistos de dos sistemas de frenado, con dirección y transmisión independientes, lo suficientemente potentes para frenar el vehículo aun en los más fuertes declives. Uno de ellos es accionado por una palanca de mano situada al lado del conductor, y el otro por el pie, mediante un pedal. En épocas anteriores, el freno sólo actuaba sobre las ruedas traseras o sobre el árbol secundario de la caja de velocidades, pero al aumentar la velocidad de los automóviles hubo que aumentar su potencia; el frenado sobre el eje trasero únicamente se reveló insuficiente, y fue necesario aprovechar todo el peso del vehículo frenando las cuatro ruedas (frenado integral). El freno de las ruedas delanteras aumenta la seguridad, porque evita el resbalamiento o derrapage. La independencia entre el freno y la dirección se consigue eligiendo adecuadamente los órganos que accionan los frenos.

La palanca de mano y el pedal de pie actúan sobre las cuatro ruedas por medio, a veces, de un servofreno.

En los frenos de las ruedas suelen montarse, especialmente en las ruedas delanteras, sistemas de dos o tres segmentos llamados *autoprensadores*, en los cuales la fuerza de frotamiento que se desarrolla sobre uno de los segmentos bajo la acción de la dirección sirve para multiplicar el esfuerzo sobre el otro o los otros segmentos. También han aparecido otros tipos de frenos, por ejemplo, los frenos de discos.

Los servofrenos. — La adopción del frenado integral ha puesto de manifiesto la necesidad de un servomecanismo para los vehículos un poco pesados, ya que el esfuerzo que el conductor ejerce normalmente sobre el pedal no permite, con las relaciones de desmultiplicación admisibles, aprovechar al máximo el esfuerzo de adherencia sobre las cuatro ruedas.

El servofreno hace intervenir, al actuar sobre los frenos, una fuerza procedente de una fuente de energía hidráulica, pneumática o del motor.

Los frenos hidráulicos. — Los frenos hidráulicos van generalizándose cada vez más. Un cilindro, en el cual se mueve un pistón que acciona el pedal del freno, inyecta a presión una mezcla fluida en las canalizaciones que llegan a otros pistones individuales, los cuales actúan directamente sobre los bocados de los frenos. Es útil poseer, además de un freno hidráulico, otro mecánico. Para facilitar los largos descensos en montaña, se ha ideado un freno electromagnético en el cual no entra en frotamiento ninguna pieza mecánica. El problema esencial es aún, para los vehículos muy rápidos, el de la refrigeración de los tambores.

La suspensión. — El problema de la suspensión es muy importante, por las grandes velocidades a que actualmente circulan los automóviles.

Desde el punto de vista de la suspensión, presenta gran interés el reducir al máximo el peso de los mecanismos no suspendidos (eje transversal delantero y puente trasero).

Las suspensiones con ejes transversales se sustituyen frecuentemente por las *ruedas independientes*, ya que los ejes normales presentan grandes inconvenientes: aumentan, con su peso y su resistencia, la masa no suspendida y, al conectar las dos ruedas de un mismo eje, hacen que repercutan sobre una de ellas los choques que el estado de la carretera inflija a la otra rueda.

Por su modo de enlace, las ruedas toman al desplazarse posiciones que, a causa de las grandes velocidades de rotación, provocan la aparición de fenómenos giroscópicos que producen vibraciones de las ruedas directrices y dificutades de dirección *(shimmy)*, por lo que se han estudiado sistemas que permitan dejar a cada rueda libertad absoluta en sus movimientos verticales.

El sistema más extendido hoy día consiste en enlazar la rueda al chasis con un paralelogramo articulado transversal de bielas muy rígidas. Estos brazos son de forma triangular y de desigual longitud, a fin de que la rueda pueda permanecer, durante sus desplazamientos en sentido vertical, paralela a ella misma, con objeto de evitar toda reacción giroscópica. La biela inferior está por lo general articulada con caucho al cuadro del chasis, mientras que la biela superior está ligada a un amortiguador hidráulico, cuya finalidad es frenar las oscilaciones del sistema elástico —ballestas o barras de torsión— que enlaza la rueda al cuadro o bastidor del chasis. Esta solución se emplea en la parte delantera; en los pequeños vehículos puede emplearse en las cuatro ruedas, pero supone una complicación en las ruedas motrices.

El sistema elástico puede estar compuesto por muelles helicoidales (verticales, inclinados u horizontales), barras de torsión, ballestas y bloques de caucho.

Los dos primeros tipos son los más empleados. Señalemos también la suspensión de elasticidad variable, con un montaje especial de muelles en espiral, inclinados y regulables.

Cualquier sistema actual de suspensión, de los que existen numerosos tipos, lleva aparatos amortiguadores.

Nuevas tendencias del automóvil. — Como el problema esencial es la reducción del consumo de combustible (gasolina), los constructores estudian la manera de que el automóvil sólo consuma el mínimo de energía. Después de haber logrado disminuir, con una mejor utilización de la materia, y sin perjuicio de la seguridad, el peso de los coches, y de haber aumentado el rendimiento de los órganos de transmisión de movimiento, han tratado de reducir la resistencia del aire aplicando los numerosos resultados conseguidos en aeronáutica a la determinación de las formas más favorables de alas y de carenas.

Vehículos carenados (o carrocerías llamadas «aerodinámicas»). — Los accesorios exteriores a las carenas, como faros, ruedas de socorro, charnelas y claxons, que aumentan fuertemente la resistencia al avance, se han reducido al mínimo, o incluso suprimido. A la parte baja de los coches se le da la forma que ofrezca menos resistencia al aire, en su recorrido entre el suelo y el chasis, y se modifican las partes de delante y de atrás, para evitar la formación de remolinos importantes. Las maquetas de automóviles se estudian hoy científicamente en los túneles aerodinámicos.

La investigación de las formas de resistencia mínima al avance originará grandes innovaciones mecánicas; algunos constructores han adoptado los vehículos de tracción delantera, y otros los vehículos con motor atrás.

Ruedas motrices delanteras. — Es lógico relacionar el motor, órgano al que se debe el esfuerzo de tracción, con las ruedas motrices que reciben dicho esfuerzo, y reducir así la longitud de las transmisiones del movimiento. De ahí dos nuevas soluciones: si el motor va delante, ruedas delanteras motrices; si el motor va detrás, ruedas traseras motrices.

La combinación de las ruedas traseras motrices con el motor delantero sólo se adoptó universalmente a causa de la dificultad que ofrecía el mando por el piloto del vehículo de los órganos de dirección.

La principal dificultad del motor delantero con ruedas motrices delanteras estriba en la transmisión del movimiento. En efecto, es necesario transmitir fuertes potencias desde un motor fijado al chasis hasta las ruedas, que por ser directrices están obligadas a efectuar desplazamientos angulares de cerca de 40°. El descubrimiento de la junta homocinética y de la junta Tracta permitió construir los vehículos de tracción



Vehículo automóvil aerodinámico: *DS 19 Citroën* (*Doc. E. Gillon*) [*Fot. Larousse*]

delantera. Presenta numerosas ventajas: carrocería muy baja, como consecuencia de la supresión de la transmisión que ligaba la caja de velocidades con el puente trasero; mejor estabilidad, por aumentar el peso de la parte delantera del vehículo y también porque, como el esfuerzo motor se ejerce sobre la parte delantera de la masa que hay que arrastrar, hay menos peligro de deslizamiento en las curvas, ya que el vehículo va remolcado, siempre que se acelere constantemente. Esta construcción permite, por último, agrupar en un lugar accesible, debajo del capot en vez de debajo del suelo del coche, órganos tales como el embrague, la caja de velocidades, el árbol de cardan, el desmultiplicador y el diferencial, que son los que más cuidados exigen.

A la parte delantera del motor va unido un cárter, en el que se alojan el cambio de velocidades, el desmultiplicador y el diferencial. De este cárter salen, perpendicularmente al eje del motor, dos platillos que están unidos a las ruedas por árboles de cardan y por una junta homocinética.

Motor trasero. Ruedas motrices traseras. — Esta combinación permite descender el nivel de las carrocerías sin perjuicio del confort, disminuir los ruidos y el calor que irradiaba el motor a las plazas delanteras, así como la realización de vehículos carenados con arreglo a los principios aerodinámicos. El capot no es más que un cofre en la parte delantera, que alberga el depósito de gasolina, las ruedas de repuesto y los equipajes, ya que la parte trasera se presta muy bien, sin perjuicio para el montaje del motor y de sus accesorios, a la realización de líneas aerodinámicas.

Jean HESSE y Jacques GLANDART

Aeronáutica

Aerostación: Reseña histórica. Fuerza ascensional. Globos libres. Globos cautivos. Dirigibles. — **Aviación:** Reseña histórica. La aerodinámica. Mecánica del vuelo y pilotaje. Propulsores aeronáuticos. Génesis y construcción del avión. Diferentes tipos de aerodinos. Fisiología del piloto. El paracaídas

Aerostación

Reseña histórica. — El honor de haber efectuado la primera ascensión en un aparato construido por el hombre corresponde a los franceses **Etienne** y **Joseph de Montgolfier;** dicha ascensión tuvo lugar el 4 de junio de 1783, en Annonay, a bordo de un "montgolfier", como se denominó el aeróstato utilizado, que era de forma aproximadamente esférica y hecho de tela de embalaje forrada de papel. La fuerza ascensional de este globo, abierto por su extremidad inferior, era debida al aire caliente producido por la combustión de una mezcla de paja húmeda y trozos de lana. El 27 de agosto del mismo año, el físico **Charles,** utilizando un procedimiento completamente diferente, consiguió también elevarse en un globo de hidrógeno. El hombre no tardó en lanzarse a los aires a bordo de estos globos. El 21 de noviembre de 1783, **Pilâtre de Rozier** y el marqués **d'Arlandes** efectuaron en París la primera travesía aérea, en un "montgolfier" que despegó en el Château de la Muette y aterrizó, al cabo de veinticuatro minutos, en la Butte-aux-Cailles. Algunos días después, el 1 de diciembre de 1783, **Charles** y **Robert** efectuaron la primera ascensión a bordo de un globo de hidrógeno, que despegó del jardín de las Tuilleries.

El 7 de enero de 1785, el médico inglés **Jeffries** y el francés **Blanchard** efectuaron la primera travesía de la Mancha en aeróstato, desde Dover a Calais.

Las primeras aplicaciones militares de los globos datan de 1794, en el sitio de Maubeuge y en la batalla de Fleurus (26 de junio). En el dominio científico, el globo fue utilizado por **Biot, Gay-Lussac, Gaston Tissandier, Sivel** y **Crocé-Spinelli;** estos dos últimos científicos encontraron la muerte el 15 de abril de 1875, después de haber ascendido hasta 8 600 m de altura. Durante el sitio de París, en 1870, se utilizaron globos para transportar la correspondencia, y también para transportar pasajeros (102 en total), entre ellos **Gambetta.**


Experiencia aerostática en 1784

Muy pronto aparecieron los globos de forma alargada, procediéndose después a numerosas investigaciones que permitieron garantizar su dirección. **Giffard,** en 1852, construyó un globo alargado movido por un motor de vapor, y **Dupuy de Lôme,** en 1872, construyó otro globo de este tipo, accionado a brazo; sin embargo, el primer dirigible que consiguió efectuar un viaje en circuito cerrado en Chalais-Meudon, el 9 de agosto de 1884, fue el *France.* El motor de explosión hizo su primera aparición en los dirigibles *Deutschland,* en 1896 y *Lebaudy,* en 1903.

Entre 1900 y 1914, la aerostación experimenta un gran desarrollo, tanto en el dominio deportivo como en el de los viajes a grandes distancias, gracias a los trabajos de **Santos-Dumont** y **Lebaudy,** en Francia, y del conde **Zeppelin,** en Alemania.

Desde 1919, los dirigibles rígidos *Zeppelin* empiezan a atravesar el Atlántico Norte y el Atlántico Sur, mientras que, en globo libre, se realizan ascensiones a gran altura: **Piccard** y **Cosyns,** en agosto de 1932, alcanzan los 16 201 m de altura, y el 29 de julio de 1935, el *Explorador II,* dirigido por **Orvil, Anderson** y **Stevens,** asciende a 22 066 metros.

Los globos sonda ascienden a más de 40 000 m y los globos ordinarios se utilizan para el lanzamiento de cohetes; en 1957, el comandante norteamericano **Simons** asciende a 31 000 m, que es la mayor altura hasta ahora alcanzada por un globo.

Fuerza ascensional. — Los aeróstatos, globos o dirigibles pueden ascender en el aire gracias al principio de Arquímedes, ya que este principio es igualmente válido para las presiones que ejercen los gases sobre los sólidos en él inmergidos. La atmósfera ejerce, pues, una presión sobre todos los cuerpos en ella inmergidos. Por consiguiente, cuando el peso de un aerostato sea inferior a esta presión de la atmósfera, el aeróstato se elevará: la diferencia entre dicha presión y el peso es precisamente la llamada *fuerza ascensional.*

La fuerza ascensional depende, pues, en gran parte, de la naturaleza del gas que contiene el aeróstato. Los primeros "montgolfiers" llevaban aire caliente que, como es sabido, es más ligero que el aire frío, pero el verdadero progreso de la aerostación se inició al empezar a llenarse los aeróstatos con gas del alumbrado, hidrógeno o, más recientemente, helio. Grancias a su escasa densidad —0,0692— el hidrógeno permite elevar cargas mucho mayores que el gas del alumbrado (densidad: 0,55) o incluso que el helio, cuya densidad es doble de la del hidrógeno; a pesar de ello, el hidrógeno, todavía utilizado para los globos libres, ha sido substituido, a causa de su enorme inflamabilidad, que ocasionó numerosos accidentes (dirigibles *Akron, Macon* e *Hindenburg)* por el helio.

Globos libres. — Un globo libre es de forma poco más o menos esférica, y termina en su parte inferior por un largo tubo denominado *manga.* La envoltura suele ser de seda, cubierta con un barniz de aceite de lino; la de los grandes globos consiste en una hoja de caucho colocada entre dos tejidos impregnados con una disolución, también de caucho, y protegidos con una pintura que atenúa el calor del sol. Actualmente, las telas de los globos destinados al estudio de la alta atmósfera están constituidas de una fina película de materia plástica muy resistente y sumamente ligera. Por lo general, el hemisferio superior del globo está cubierto con una *red,* y las cuerdas que de ella cuelgan están fijadas a un círculo de madera o de acero al sual se suspende la *barquilla,* donde va la tripulación, el *lastre* y los *aparejos* que sirven para la maniobra del globo.

Aunque no es posible dirigir un globo libre, el aeronauta puede influir sobre sus movimientos verticales. El lastre, generalmente constituido por sacos de arena, permite al aeronauta, al arrojarlo al aire, disminuir el peso de su globo y ganar así altura. En la parte superior de la cubierta hay una *válvula* que puede accionarse con una cuerda que atraviesa el globo; entreabriéndola, deja escapar gas, lo que disminuye la fuerza ascensional del globo, que por esta causa empieza a

descender. En caso de aterrizaje rápido, el *cable guía* hace que disminuya la velocidad del descenso del globo en el momento en que toma contacto con el suelo. Este cable guía tiene unos 50 m de longitud, y cuelga fuera de la barquilla; cuando su extremidad empieza a apoyarse en el suelo, su función es doble: disminuye la velocidad de descenso del globo, aligerándolo, y reduce, además, al frotar con el suelo, los desplazamientos laterales debidos al viento. El aeronauta puede también recurrir a abrir una *escotilla* arrancando con una cuerda una banda de la cubierta; el gas se escapa entonces rápidamente, evitando así que el globo se arrastre por el suelo.

Al iniciarse la ascensión, el globo nunca está completamente lleno de gas, a fin de que la masa de éste pueda dilatarse libremente conforme disminuya la presión exterior durante la ascensión. Los grandes globos estratosféricos, que han sobrepasado los 30 000 m de altura, no contenían más que una débil cantidad de gas con respecto a su volumen total.

Además de los globos libres deportivos, la ciencia moderna ha permitido la construcción de *globos-sondas* destinados a la meteorología, y, en ciertos casos, de *globos laboratorios* para el estudio de la alta atmósfera o para la detección de las corrientes aéreas que circulan a gran altura. También los cohetes utilizan los globos para franquear la atmósfera sin consumo de carburante: son los *globos-cohete*, que permiten a los cohetes por ellos sostenidos alcanzar alturas de varios kilómetros antes de encender sus motores.

Globos cautivos. — Los globos cautivos, sujetos al suelo por un cable, tienen una forma especial llamada de *cometa*, para que no giren alrededor de su cable y no se inclinen a causa del viento. Constan de una parte cilíndrica, con un timón en su final, y la extremidad inferior del cable va sujeta a un torno que permite regular los desplazamientos verticales del globo.

Dirigibles. — El dirigible consta de una *carena* de forma alargada y llena de gas, de una *barquilla* para la tripulación, los pasajeros o el flete, y de los *órganos de propulsión, dirección y estabilización.* Entre sus diversos tipos pueden citarse los *dirigibles rápidos*, en los que la presión interior del gas permite conservar la forma de la carena, y los *dirigibles rígidos* (un ejemplo de ellos es el *Zeppelin*), cuya carena, rígida, está constituida por anchos anillos de aluminio o de duraluminio ligados por vigas longitudinales; sus extremidades son de forma cónica, y el cono trasero lleva los timones de dirección y de profundidad y los empenajes. No toda la carena está llena de gas; su interior está dividido en compartimientos estancos. El dirigible más grande de todos los que se han construido, el *Graf Zeppelin* (1938), tenía una longitud de 245 m., con un volumen de más de 200 000 m³; su peso total era de 222 000 kg y podía recorrer 16 500 km.

Los dirigibles se elevan por la fuerza ascensional que les imprimen los gases que contienen. Al final de su travesía, como sus motores han consumido el carburante, pesan menos que en el momento de partida y para poder descender tienen que liberar gas o bien maniobrar los motores y los órganos de dirección, a fin de crear una fuerza en sentido descendente. En ciertos modelos de zepelines, el motor funcionaba con "gas azul", que es más ligero que el aire; dicho gas estaba contenido en pequeños globos que, a medida que iba consumiéndose el gas, se llenaban de aire con un ventilador. De esta forma, el aterrizaje era mucho más sencillo.

Aviación

Reseña histórica. — Los estudios de **Leonardo de Vinci** (1452-1519) pueden considerarse como las primeras etapas serias de la conquista del aire, que se inició en 1783 por los hermanos **Montgolfier.** No obstante, hasta 1809, la aviación no empieza a ser objeto de investigaciones precisas con el inglés **Cayley,** precursor de la aerodinámica.

En 1872, el joven ingeniero francés **Alphonse Pénaud** consiguió hacer volar un modelo reducido de aeroplano con hélice trasera, accionada por una madeja de caucho retorcida, poniendo así en evidencia, prácticamente, la reacción del viento con respecto a una superficie inclinada, reacción cuya componente vertical equilibra el peso del objeto. Penaud concibió después, en un memorable proyecto de aeroplano (1876), todos los dispositivos esenciales de los aviones modernos.

La primera ascensión aérea efectuada por el hombre en un aparato más pesado que el aire fue la del francés **Clément Ader** a bordo de su avión "*Eolo*", que estaba propulsado por un motor a vapor de su invención. Tuvo lugar esta ascensión en la llanura de Satory, en Armainvilliers, el 9 de octubre de 1890.

El vuelo planeado fue objeto de numerosas experiencias: primero fueron los célebres vuelos del alemán **Otto Lilienthal** entre 1891 y 1896, en planeadores monoplanos. Lilienthal murió al realizar su 2 000 vuelo. Entre 1896 y 1901, el francés **Octave Chanute,** que vivía en los Estados Unidos, ideó y experimentó un gran número de planeadores biplanos y multiplanos. Desde entonces se repitieron estas experiencias, realizadas, entre otros, por los norteamericanos **Orville** y **Wilbur Wright,** y por el capitán francés **Ferdinand Ferber.**

El primer vuelo de un avión equipado con un motor de explosión fue efectuado en los Estados Unidos, el 17 de diciembre de 1903, por los hermanos Wright, en las dunas de Kitty-Hawk. El 12 de noviembre de 1906, **Santos-Dumont,** en París, consiguió volar 220 m en línea recta, a seis metros de altura, a bordo de un aeroplano con motor *Antoinette*, de 50 HP. **Henri Farman** fue el primero en realizar un vuelo en circuito cerrado de un kilómetro, el 21 de enero de 1908, en Issy-les-Molineaux, y el 30 de octubre del mismo año, el primer viaje de ciudad a ciudad (de Châlons a Reims). El 25 de julio de 1909, **Louis Blériot** atravesaba el canal de la Mancha, desde Calais a Dover, a bordo de un monoplano de su construcción.

El 28 de marzo de 1910, el constructor y piloto marsellés **Henri Fabre** voló sobre el lago de Berre a bordo del primer hidroavión construido. El 23 de septiembre, el piloto peruano **Geo Chávez** franqueó los Alpes. En septiembre de 1913, **Roland Garros** atravesó el Mediterráneo; dos días antes, **Adolphe Pégoud** había efectuado voluntariamente el primer rizo.

Los primeros aviones militares, tanto de caza como de bombardeo, se construyeron durante la primera guerra mundial (1914-1918), y pueden citarse entre los grandes ases de la aviación de "caza" el francés **Guynemer** y el alemán **von Richthofen.**

Con el avión cohete experimental norteamericano X-15 se reducen progresivamente los límites entre los campos de la aeronáutica y el de la astronáutica. Este aparato, después de una serie de "récords" sucesivos, alcanzó, a fines de abril de 1962, una altura de 75 000 m a una velocidad superior a 5 000 km/h.



El avión-cohete *Griffon*, propulsado por un estatorreactor *Atar*, ha realizado la velocidad de Mach 2 (*Fot. Agencia Intercontinental*)

La aerodinámica. — El avión puede sustentarse en el aire en virtud de la acción del aire sobre una placa inclinada, o sea, del movimiento de traslación que tiende a levantarla con tanta más fuerza cuanto mayor sea la velocidad y la superficie de la placa. La intensidad de esta *fuerza de sustentación* depende de la forma de la sección que presenta la placa al sentido del movimiento; esta sección se llama *perfil*, y ha sido objeto de importantes estudios aerodinámicos consagrados a descubrir los mejores perfiles en función de la velocidad de utilización.

Cuando el avión llega a alcanzar velocidades próximas a la del sonido se producen fenómenos aerodinámicos especiales. La concentración de las vibraciones emitidas por el avión y de las perturbaciones que este último provoca en la atmósfera dan como resultado la formación de *ondas de choque* delante del aparato. Los fenómenos sónicos empiezan a manifestarse a partir de Mach 0,7 (aproximadamente 840 km/h) bajo forma de ondas de choque en "lambda" que se originan sobre las alas; como estas ondas de choque son superficies de discontinuidad de presión, provocan importantes contracciones en las estructuras y vibraciones intensas; por esta razón, los aviones franquean lo más rápidamente posible el campo de velocidades comprendido entre Mach 0,7 y 1,2 (o sea entre 840 y 1 450 km/h, a 15° C), para llegar al régimen de vuelo supersónico, que es más estable, si bien completamente diferente de los regímenes de vuelos subsónicos.

Desde el momento en que los aviones superan la velocidad del sonido, el aire en contacto con ellos sufre un calentamiento aerodinámico. A Mach 1, este calentamiento es sólo de 35° C y no plantea ningún problema particular. A partir de Mach 2 alcanza los 200° C, aumentando después muy rápidamente, hasta llegar a superar los 1 000° C entre Mach 4 y 5. La aparición de estos fenómenos caloríficos ha dado lugar a una nueva rama de la aerodinámica, que se ha denominado *aerotermodinámica*, cuyo objeto es el estudio de las transferencias de calor entre las diferentes capas de aire, y entre el aire exterior y las estructuras del avión.

Las cualidades aerodinámicas de un avión se estudian, sobre maquetas de dimensiones reducidas, en los *túneles aerodinámicos*; estos túneles constan de tres partes esenciales: un *colector* o convergente de entrada, en el que el aire adquiere una velocidad determinada por la potencia del ventilador; una *cámara de experiencias*, de sección constante, y un *difusor o divergente*, en el que el aire se va frenando gradualmente. Para que los resultados obtenidos con las maquetas puedan trasponerse a los aviones auténticos, es necesario observar ciertas leyes de *semejanza*.

Los túneles aerodinámicos pueden ser de circulación continua, si el difusor se prolonga por una conducción curva que lleva el aire, a velocidad reducida, a la entrada del colector, o de circulación discontinua, cuando los dos extremos de la instalación dan a la atmósfera o a un "hall" de grandes dimensiones. Se distinguen varios tipos de túneles, según la velocidad: de velocidad moderada (inferior a Mach 0,3), de velocidad subsónica (Mach 0,2 a 1), transónica (Mach 0,8 a 1,2), super-

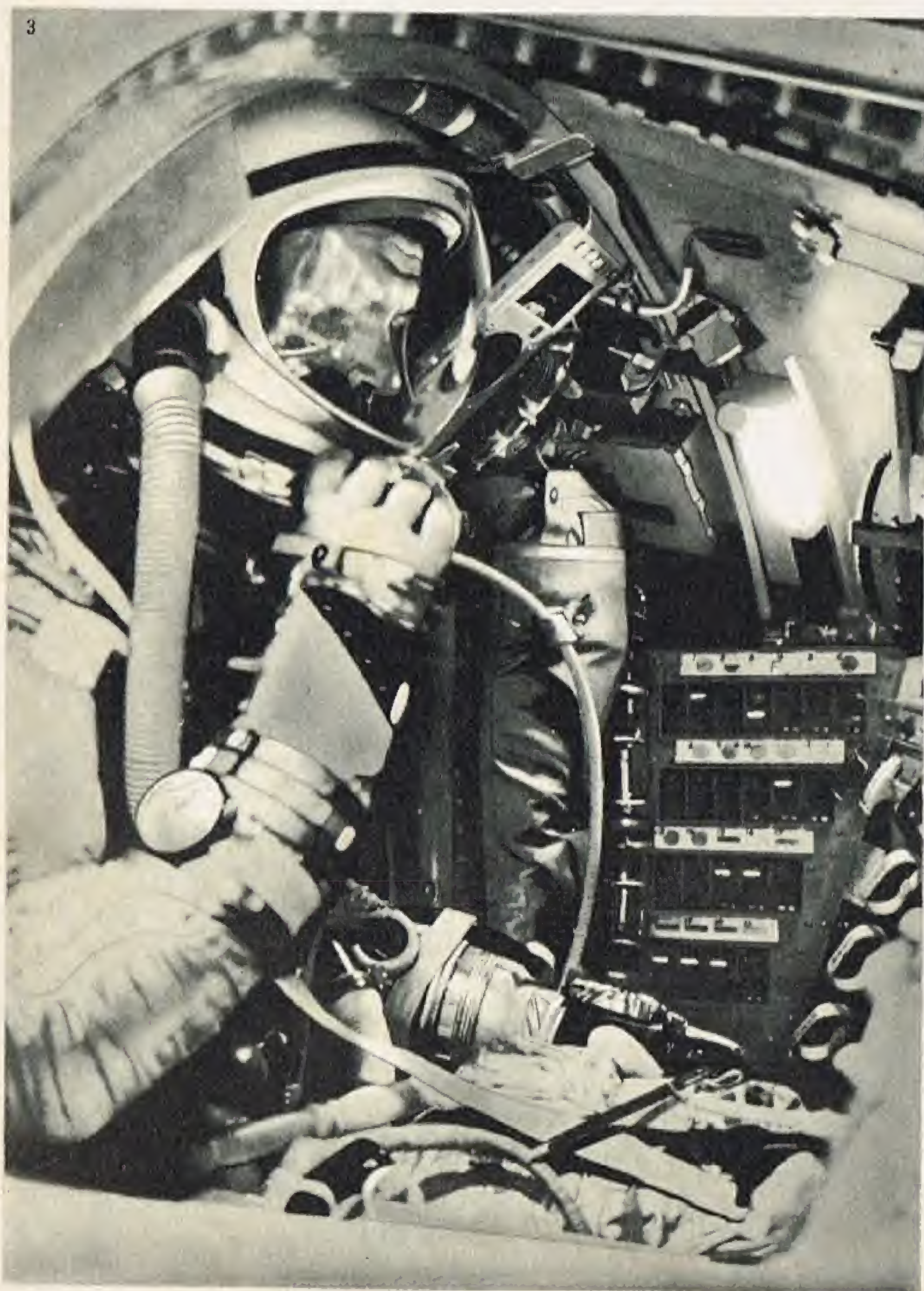




Arriba, a la izquierda : Parte anterior del cohete en que Y. Gagarin realizó en 1961 el primer vuelo orbital alrededor de la Tierra (Fot. Keystone)
A la derecha : Los cosmonautas soviéticos Gagarin, Titov, Nicolaiev, Popovich, Bykovski y Terechkova (Fot. A. P. N.)





3


4


1. El astronauta norteamericano A. B. Shepard en el acto de probar un asiento de gomaespuma destinado a una experiencia de vuelo espacial

2. El astronauta norteamericano J. Glenn penetra en la cápsula de un cohete espacial, en Cabo Cañaveral, hoy Cabo J. F. Kennedy

3. J. Glenn en la cápsula de su cohete

4. Recuperación de la cápsula en que el astronauta norteamericano Leroy Gordon acaba de realizar su vuelo espacial del 16 de mayo de 1963

Lámina pág. anterior : Lanzamiento del cohete « Topacio » (Fot. Constantin/Sereb)



El birreactor *Caravelle*, avión comercial francés, de propulsión a reacción (*Fot. Sud-Aviation*)

sónica (Mach 1 a 5) e hipersónica, por encima de Mach 5. La mayor parte de estos túneles aerodinámicos son de *ráfagas*, es decir, que funcionan durante un tiempo muy corto, vaciando un depósito de aire comprimido.

Mecánica del vuelo y pilotaje. — Las cuatro fuerzas principales que actúan sobre un avión en vuelo son: el *peso* del aparato, dirigido siempre según la vertical; la *fuerza propulsora* del grupo motopropulsor, que obra en el sentido del eje del avión; la *fuerza de sustentación*, constantemente perpendicular al plano de las alas; y la *resistencia al avance*, fuerza que frena el avión, actuando en el sentido de su eje; estas dos últimas fuerzas dependen, además, de la velocidad de vuelo. En vuelo horizontal, la fuerza de sustentación debe equilibrar exactamente el peso del avión, y la fuerza propulsora debe ser superior a la de resistencia al avance. En vuelo de descenso, el piloto regula la velocidad del avión, que es entonces función del peso del aparato y de la fuerza propulsora, de forma que la resultante de las fuerzas de sustentación y de resistencia al avance equilibre el peso. Durante la ascensión, la fuerza de sustentación debe equilibrar la componente del peso, que es perpendicular al plano de las alas, y la fuerza de propulsión debe ser lo suficientemente grande para equilibrar la de resistencia al avance más la componente del peso del aparato según el eje del avión, y todo ello sin dejar de proporcionar la propulsión necesaria para mantener el movimiento ascendente.

En los virajes actúa sobre el avión una nueva fuerza: la *fuerza centrífuga;* el piloto inclina el avión de forma que la fuerza de sustentación se oponga a la resultante del peso y de la fuerza centrífuga. Si el viraje se efectúa correctamente, el equilibrio de estas fuerzas es riguroso; si la inclinación es demasiado débil, predomina la fuerza centrífuga y el avión "se sale" de la curva, es decir, *patina*. En el caso contrario, es decir, si la inclinación es demasiado grande, predomina el peso y el avión *resbala* sobre el ala más baja.

Para la conducción del avión, el piloto dispone de tres mandos principales: la *manilla de los gases*, la *palanca de mando* y la *palanca de pedales* o "palonnier". La manilla de los gases sirve para regular el régimen del propulsor en función de las condiciones de vuelo. La palanca de mando actúa sobre los timones de profundidad, situados en el empenaje horizontal trasero, y según se mueva hacia adelante o hacia atrás producirá el ascenso o descenso del avión; cuando se mueve a la izquierda o a la derecha, la palanca actúa sobre los alerones de alabeo, que se mueven disimétricamente, e imprimen al avión una inclinación que le permite efectuar un viraje. Por último, la palanca de pedales acciona el timón de dirección situado en la deriva vertical trasera; si se pisa el pedal izquierdo, el timón de dirección gira también hacia la izquierda, y el avión vira a la izquierda; análogamente, si se pisa el derecho, el avión virará a la derecha. Para efectuar un viraje correcto, se conjugan ambas acciones, a fin de que, simultáneamente con el viraje del avión, éste se incline hacia el interior del mismo. El piloto dispone además, en los aviones modernos, de los *alerones hipersustentadores*, que acciona en el momento de aterrizar para aumentar la fuerza de sustentación del avión a velocidad reducida, o también cuando vuela con grandes ángulos de ataque. Para aminorar su velocidad en picado, los aviones rápidos llevan *frenos aerodinámicos* —o *aerofrenos*—, que permiten aumentar momentáneamente, de modo importante, el arrastre del aparato.

Además del pilotaje clásico, la acrobacia aérea consiste en un variado número de maniobras no habituales, entre las cuales pueden citarse el vuelo en *picado*, el *resbalamiento sobre el ala*, el *viraje vertical*, el *rizo*, el *vuelo invertido*, el *tonel;* la acrobacia de *alta escuela* comprende también el vuelo lento y las figuras combinadas.

Propulsores aeronáuticos. — Si se prescinde de la aplicación de la máquina de vapor en el primer avión de Clément Ader, que no tuvo más aplicaciones posteriores, puede considerarse que, hasta 1944, el único propulsor aeronáutico empleado ha sido el motor de émbolos o pistones que acciona una hélice. Ambos, motor y hélice, constituyen un propulsor a reacción que funciona según un ciclo de cuatro tiempos, cuyas fases principales son: la *compresión*, que consume trabajo; la *combustión*, que provoca la transferencia a los gases de la energía del carburante, y la *expansión*, que utiliza esta energía para efectuar la compresión inicial y también para provocar la propulsión del avión por medio de la hélice.

El motor de émbolos con movimiento alterno y hélice, alcanzó su apogeo durante la segunda guerra mundial. Los motores más potentes que se construyeron desarrollaban 4 000 HP, con un consumo de 160 g/HP-h. Al motor de émbolos se aplicó un interesante perfeccionamiento: el *motor compound*, que utiliza la energía residual de los gases de escape para mover una turbina acoplada a un compresor; a pesar de ello, con el motor de émbolos, que se utiliza todavía mucho en los aviones comerciales, no se pueden rebasar alturas de 10 000 a 12 000 metros, ni pasar de una velocidad de 900 kilómetros hora.

Para facilitar la evolución progresiva de la aviación hacia la obtención de alturas y velocidades cada vez mayores, la técnica de la propulsión se orientó hacia la turbina de gas, en sus formas de *turbopropulsor* o de *turborreactor*. El proceso termodinámico interno es en este caso comparable al de motor clásico **(v. esquema, pág. 196)**; pero mientras que en el motor de émbolos las diferentes fases de evolución se verifican siempre en el cilindro, en las turbomáquinas se distribuyen por el espacio. Por este motivo, los turborreactores y turbopropulsores han permitido que se alcancen potencias muy superiores, puesto que se dispone siempre de un flujo de energía; además, con la substitución del movimiento alterno de los émbolos por el movimiento circular, se ha conseguido una mayor sencillez en la fabricación de estos motores. Mientras que el turbopropulsor da excelentes resultados a las velocidades subsónicas, el turborreactor, sobre todo si está dotado de dispositivo de postcombustión (nueva combustión en la tobera de eyección que desempeña la función de estatorreactor complementario), permite vuelos a una velocidad igual a dos veces y media la del sonido, y alcanzar alturas de 25 000 m.

El *pulsorreactor* tiene pocas aplicaciones y no parece que tenga un gran porvenir; en cambio, el *estatorreactor* o *tobera termopropulsiva*, es el único propulsor actual que permite la obtención de las mayores velocidades que pueden conseguirse en la atmósfera, puesto que puede funcionar a velocidades superiores a cuatro veces la del sonido, a 30 000 ó 40 000 m de altura. Los *motores cohete* **(v. Cohetes, pág. 211)** son los únicos que pueden competir con él, aunque presentan el inconveniente de un consumo elevado. El consumo del estatorreactor es inferior al del cohete; en efecto, utiliza el oxígeno atmosférico para funcionar, en tanto que el cohete lleva su propio carburante; esta es, precisamente, la razón por la cual el cohete puede funcionar más allá de la atmósfera.

En el momento actual, la alimentación de todos estos propulsores se hace a base de combustibles líquidos, de escaso poder calorífico; se estudian otros combustibles mucho más potentes, entre ellos los derivados del boro, para substituir los hidrocarburos, que son los más utilizados. No obstante, todos estos tipos de reactores pueden ser movidos por la energía nuclear, para lo cual basta con substituir su cámara de combustión por transformadores de calor comunicados con una pila atómica. Los primeros ensayos se efectuaron con turborreactores, pero la aplicación más interesante se hará, al parecer, con estatorreactores, y permitirá, sin duda, obtener extensos radios de acción.

La energía nuclear permitirá también la creación de motores-cohete, de gran potencia y gran autonomía, que impulsarán las astronaves del futuro **(v. Astronáutica, pág. 213)**.

Génesis y construcción del avión. — El programa de estudios de un nuevo avión, civil o militar, comienza fijando su empleo (carga, radio de acción, altura de vuelo...) y las mejores condiciones de utilización (velocidad, consumo, distancia de despegue o de ascenso...). El centro de estudios propone entonces un anteproyecto, que sirve de base a todos los estudios posteriores, en el que va incluido un primer presupuesto de carácter general; en ese momento se determinan cuáles serán los propulsores que habrán de fabricarse en serie al mismo tiempo que el avión. Una vez que se ha precisado la forma general exterior, se construye una maqueta de madera para los ensayos en el túnel aerodinámico y se estudian los diversos detalles sobre otra maqueta construida al tamaño exacto que tendrá después el avión real. Sobre esta maqueta se estudian: la disposición del puesto de pilotaje, de la cabina de los pasajeros y de los lugares reservados a las mercancías o los equipajes; el emplazamiento de los equipos militares, de las canalizaciones y circuitos de todas clases, etc.

Simultáneamente se someten a ensayos en tierra y en vuelo los numerosos equipos que habrán de montarse sobre los aviones de serie, entre otros, el tren de aterrizaje y los propulsores, y también, gradualmente, cada uno de los conjuntos o subconjuntos del aparato: la cabina a presión se somete a ciclos reiterados de compresión y descompresión, el ala y, con frecuencia, la totalidad de la célula se ensayan hasta la ruptura. Finalizada la construcción del prototipo, empiezan los ensayos en vuelo: se trata de verificar los cálculos efectuados por separado para cada parte del avión, coordinar las reacciones de los diversos elementos, establecer las marcas exactas, prever los programas de revisión de los aviones de serie y comprobar la aptitud del avión para cumplir las misiones que se le han asignado. Los ensayos en vuelo los inicia el constructor, que prueba su aparato e introduce las modificaciones que juzga necesarias; se prosiguen después en el centro de ensayos oficial las aptitudes de vuelo y se determinan exactamente las características; se realizan, por último, con el concurso de los eventuales utilizadores, vuelos experimentales en todas las futuras condiciones de utilización.

Mientras que el prototipo finaliza sus ensayos, el constructor registra los primeros encargos de serie, y se envían los dibujos a los talleres de

fabricación, organizados con arreglo a un plan decidido con varios meses de antelación. Los diferentes servicios de las fábricas se encargan de atender el aprovisionamiento en materias primas, los encargos de equipos a las sociedades constructoras, la publicidad del aparato en el país y en el extranjero, etc. El aparato en construcción se convierte así en el eje central de la fábrica, sobre el que giran todas las actividades; todas, salvo las del centro de estudios, que ya se habrá consagrado a un anteproyecto de otra versión mejorada, o incluso de un nuevo aparato que responda a otras exigencias.

En la *construccion* de los aviones se utilizan en la actualidad, casi exclusivamente, materiales metálicos. Se emplean muchos los revestimientos de protección, que contribuyen a la resistencia del conjunto de la estructura. Desde hace algunos años, se han perfeccionado las técnicas de fabricación (técnicas de soldadura, alas y revestimientos), y se han utilizado numerosos materiales nuevos (titanio y sus derivados, panales metálicos, materiales "sandwichs" de gran ligereza, etc.). Los productos plásticos se están utilizando también cada vez más, principalmente en las construcciones en estratificados.

Diferentes tipos de aerodinos. — El *avión* aprovecha la reacción del aire en movimiento sobre sus alas, movimiento producido por el propulsor de que va dotado. El *planeador*, con el que se realizan *vuelos planeados* o *vuelos a vela*, no lleva propulsor, sino que utiliza las corrientes atmosféricas ascendentes para su impulso (ascendencias de pendiente, térmicas o de ondas).

El *hidroavión*, que toma su impulso desde el agua, lleva flotadores que aprovechan la reacción del movimiento del agua en ellos, una vez que el aparato está en movimiento, para permitir su despegue; con este objeto, el fondo de los flotadores no es plano, sino que lleva uno o varios salientes que facilitan esa operación. Los primeros hidroaviones se construían con dos *flotadores simétricos* con respecto al eje del hidroavión. También se construyeron hidroaviones con un flotador único situado debajo del fuselaje, pero la mayoría de los grandes hidroaviones son de *casco*; en los de este tipo, es la parte inferior del fuselaje la que está en contacto con el agua. Otros tipos más recientes llevan *hidroesquís*, y utilizan las propiedades del ala inmergida. Los *anfibios* llevan a la vez flotadores (o un casco) y un tren de aterrizaje, lo que les permite despegar lo mismo desde tierra que desde el agua.

Los *giroaviones* no se sustentan con alas fijas, sino con un rotor en rotación. El *autogiro* utiliza su rotor sólo para la sustentación; éste gira libremente en el viento relativo que crea el movimiento de traslación del aparato, producido por un propulsor. El *helicóptero* tiene un rotor accionado por un motor; este rotor sirve lo mismo para los movimientos verticales que para los desplazamientos horizontales del aparato, merced a un cambio en el régimen de las palas del rotor. Por último, el *girodino* lleva un rotor movido por un motor, que sirve sólo para la sustentación, y además un medio de propulsión que utiliza para los desplazamientos horizontales.

Hace algunos años apareció una nueva categoría de aeronaves: los *aparatos de despegue vertical*. Los girodinos y los helicópteros pueden despegar verticalmente, pero sus velocidades de desplazamiento horizontal son limitadas. El *combinado* tiene alas, como el avión, y un rotor, como el giroavión, y reúne, por tanto, las ventajas de una gran velocidad horizontal y la posibilidad de despegar verticalmente. Sin embargo, los modelos más interesantes desde el punto de vista técnico son los *convertibles* por basculamiento de los grupos motopropulsores o incluso por basculamiento completo del aparato; entre los aparatos de este tipo, los *coleópteros* despegan y aterrizan verticalmente y pueden mantenerse en vuelo estacionario, a la vez que alcanzar velocidades de ascensión y horizontales comparables a las de los más modernos aviones supersónicos. Esto sólo ha sido posible desde que los turborreactores o estatorreactores han podido desarrollar un empuje superior a su propio peso. La tendencia actual de la aviación es conseguir el despegue vertical, el cual permitirá prescindir todo lo posible de las largas y costosas pistas de los aeródromos actuales.

Con el desarrollo de la tecnología de los turborreactores, es ya posible el despegue vertical sin necesidad de realizar modificaciones importantes en la forma o la posición de los elementos que constituyen el aparato. Se puede utilizar uno o varios pequeños turborreactores montados verticalmente y que se caracterizan por su escaso volumen y peso, y por su gran empuje específico, o bien emplear turborreactores de toberas orientables, fabricadas por Bristol en Gran Bretaña. Este último sistema es el que ofrece, al parecer, mejores perspectivas para el futuro, ya que no necesita prácticamente, añadir ningún peso suplementario, puesto que tanto la propulsión como la sustentación en el despegue y en el aterrizaje dependen de la misma fuente de potencia.

La técnica del despegue vertical es objeto de numerosos estudios: su primer objetivo es obtener aviones militares de gran movilidad, que en caso de conflicto armado puedan despegar inmediatamente desde un terreno reducido al mínimo. En cambio, en el aspecto civil, no parece que este método sea lo suficientemente económico para ser empleado. Por este motivo, la aviación civil se interesa más por la evolución de la construcción de aviones de despegue corto, siendo uno de los tipos más avanzados en este aspecto el avión cargo francés *Breguet* 940, que utiliza un ala impulsada en toda su envergadura por grandes hélices sincronizadas y por un juego importante de persianas hipersustentadoras, que pueden girar hasta 90°. En estas condiciones, un avión de 20 toneladas puede despegar en menos de 200 m.

Fisiología del piloto. — El hombre que pilota los aviones modernos está expuesto a numerosos trastornos orgánicos, que se manifiestan al volar en ciertas condiciones. No es cierto que la velocidad influya en la fisiología humana, como ya se demostró hace mucho tiempo; en cambio, la *aceleración* puede tener muy graves repercusiones, por lo cual ha sido estudiada con gran atención en todos los centros médico-fisiológicos del mundo. La aceleración presenta, para el piloto sentado, dos peligros de diferente importancia: el *velo negro* y el *velo rojo*. El velo negro aparece a partir de una aceleración de 4 g, en el sentido asiento-cabeza; el corazón carece entonces de fuerza suficiente para irrigar las partes altas del cuerpo, y no llega sangre al cerebro. Este trastorno, que obscurece la visión, es pasajero y desaparece algunos minutos después de cesar la aceleración. El velo rojo es mucho más grave, porque, producido por una importante aceleración en el sentido cabeza-asiento, es provocado por un repentino aflujo de sangre a la cavidad cervical. Si la aceleración es muy brusca y de larga duración, puede producirse la rotura de los vasos sanguíneos del cerebro, lo que produce una prolongada pérdida del conocimiento e incluso la muerte.



El *Bell 47 G*, helicóptero ligero para usos civiles y militares (*Fot. X.*)

La altura produce también modificaciones en el funcionamiento de los órganos vitales: además de la rarefacción del aire, que dificulta gradualmente la respiración, el oxígeno se fija cada vez con mayor dificultad en la sangre, que se empobrece lentamente. Hasta 10 000 ó 12 000 m de altura la máscara respiratoria protege lo suficiente, pero a mayores alturas es necesario utilizar un equipo aislante o cabinas acondicionadas a presión soportable. Los equipos de vuelo que se utilizan en los aviones de ensayo y en los aviones militares están especialmente estudiados para limitar al máximo las reacciones fisiológicas del piloto a grandes alturas y durante las bruscas aceleraciones, y están provistos, en particular, de dispositivos neumáticos que pueden inflarse automáticamente para regularizar la circulación y presión sanguínea del piloto durante las aceleraciones.



Asiento eyectable

El paracaídas. — El paracaídas era ya conocido en la antigua China, pero sus principios científicos fueron establecidos por **Leonardo de Vinci.** El primer descenso en paracaídas tuvo lugar el año 1798, pero hasta 1912 no empezaron a considerarse estos descensos como un medio de salvamento en vez de simples exhibiciones acrobáticas. Desde 1918, los aviadores son equipados sistemáticamente con paracaídas, y en 1930 se inició el desarrollo del paracaidismo deportivo y militar en diversos países. Durante la segunda guerra mundial se efectuaron numerosas operaciones militares con paracaidistas en Polonia, Holanda y Creta, por los alemanes, y en Birmania, Sicilia, Italia y Normandía, por los Aliados.

El paracaídas lo componen: un *velamen* o *campana* de seda o de Nylon, de forma hemisférica, que tiene en su parte superior o vértice un orificio, llamado *chimenea*, para la evacuación del aire que recoge. Este velamen va unido al atelaje, que sostiene al hombre o el material, por numerosos *cordones de suspensión*. La velocidad de descenso del cuerpo humano en caída libre es aproximadamente 50 m/s; con un paracaídas se reduce a 6 ó 7 m/s, velocidad que corresponde a un salto en el vacío de tres metros de altura. El paracaídas de salvamento pesa 8,5 kg, aproximadamente. Se distinguen los paracaídas de velamen completo y los de bandas: estos últimos se emplean principalmente para los descensos a gran velocidad.

El paracaídas también se utiliza para lanzamientos de material y pueden lanzarse con él más de seis toneladas de una sola vez. En estos casos se utilizan grupos de dos a diez paracaídas, o paracaídas especiales, que tienen hasta 20 m de diámetro y son capaces de sostener hasta 1 500 kg. Pueden, igualmente, utilizarse en grupos cuando se trata de concentraciones de grandes cargas.



Equipo de vuelo estudiado para la resistencia a presiones muy fuertes



Avión de transporte *Boeing 707 Intercontinental*. Su velocidad media se sitúa en los alrededores de 900 km/h. Existe en tres versiones: mercantil, militar o civil.

El paracaídas ha pasado también a formar parte del propio equipo del avión, ya que desempeña dos importantes funciones: frenar y evitar la caída en barrena. El *paracaídas-freno* es muy utilizado en los aviones a reacción, a fin de aminorar la carrera de los aparatos durante el aterrizaje; permite un frenado eficaz sin actuar con demasiada fuerza sobre los frenos de las ruedas, que desgastan muy rápidamente los neumáticos. Por otra parte, como la barrena es un estado de equilibrio para un avión, es necesario, para salir de ella, la intervención de un fenómeno exterior que rompa dicho equilibrio: esta función la desempeña el *paracaídas de barrena.*

En los aviones modernos de velocidades superiores a los 500 km/h no es posible garantizar el salvamento de la tripulación con el solo empleo del paracaídas: se utiliza entonces el *asiento eyectable*. Consiste éste en un asiento montado sobre correderas verticales que, al explotar un cartucho pirotécnico, es proyectado bruscamente al exterior con el piloto. Algunos asientos se disparan automáticamente cuando el piloto abate una cortinilla de protección sobre su cara, y otros llevan en los apoyos de las rodillas un mando que hace funcionar el mecanismo de lanzamiento. La mayoría de los asientos son proyectados hacia arriba, pero también se han hecho ensayos de proyección hacia abajo. El asiento, una vez lanzado, se estabiliza durante su descenso con un pequeño paracaídas; la separación del piloto de su asiento puede ser automática o voluntaria; después, el piloto continúa descendiendo con su paracaídas personal. También se han concebido asientos eyectables especiales para el salvamento de pilotos que vuelan a gran velocidad a ras del suelo, provistos de una serie de paracaídas que se van abriendo sucesivamente con gran rapidez.

A velocidades superiores a 800 km/h, o a grandes alturas, ya no puede garantizarse el salvamento de un piloto por medio del asiento eyectable: en el primer caso, puede morir en el momento de la eyección a causa del choque con el aire, y, en el segundo caso, por asfixia. Por estas razones se han construido cabinas absolutamente aisladas que se largan completas y que el piloto no abandona para utilizar su paracaídas personal hasta que llega a una atmósfera respirable.

Cohetes

Reseña histórica. — **El motor cohete:** El motor cohete de combustible sólido. El motor cohete de combustible líquido. — **Conducción del cohete:** Teleconducción. Autoconducción. — **Las diferentes clases de cohetes**

Reseña histórica. — Según la leyenda, el cohete es una invención china anterior en varios miles de años a nuestra era. Aunque en los textos antiguos se encuentran alusiones a "fuegos volantes", no parece que la invención del cohete sea anterior al primer milenio antes de J. C. La primera utilización histórica del cohete en el dominio militar data del año 85, en China, bajo el reinado de *Vi-Tey*. Después de otras numerosas utilizaciones, principalmente por los bizantinos y los árabes, en el primer milenio de nuestra era, los cohetes reaparecen en la Edad Media, en el sitio de Antioquía (siglo XI). A *Roger Bacon*, en 1260, se deben las primeras mejoras conocidas de la mezcla propulsora del cohete, basadas en ideas de *Marco Greco* (siglo VIII).

En 1420 se constituyeron en Francia, durante la guerra de los Cien Años, los primeros cuerpos de coheteros; gracias a ellos pudo Juana de Arco destruir las máquinas de guerra inglesas en Orleáns. En 1804, al volver de las Indias, el inglés *William Congreve* montó un taller de fabricación de cohetes, de 2 000 m de alcance, que se utilizaron en diferentes batallas entre 1806 y 1814. Pese a los numerosos estudios realizados en diversos países, como quedó reconocida la supremacía del obús en el sitio de Sebastopol, en 1855, el cohete experimentó apenas desarrollo hasta la guerra de 1914-1918, durante la cual aparecieron los primeros cohetes "aire-aire", utilizados para destruir los globos de observación alemanes: los cohetes *Le Prieur* (1917).

El estudio de los cohetes experimentales se intensificó, desde 1920, en todo el mundo, especialmente en Alemania, con *Opel, Vallier, Tiling, Schmield* y *Winckler*. En 1930 se fundó en Reinickendorf, cerca de Berlín, la Raketenflugplatz, con *Oberth, Nebel, Rieder* y *Von Braun*. En Kummersdorf, el general *Dornberger* instaló un centro de ensayos militares, en donde se realizaron los experimentos que condujeron a la construcción de los cohetes *A 4* (o "V 2"). Estos estudios y ensayos se prosiguieron, desde 1937, en Peenemünde, a orillas del Báltico, primer centro de ensayos y perfeccionamiento de armas especiales; su resultado fueron los *V 2*, con los cuales fueron bombardeados París y Londres el 8 de septiembre de 1944. También se perfeccionaron durante la segunda guerra mundial otros muchos cohetes militares: armas antiaéreas lanzadas desde el suelo o desde otro avión, por ejemplo, cohetes anticarros. Al mismo tiempo, se perfeccionaba en los Estados Unidos la técnica de realizar despegues de aviones con ayuda de cohetes.

Después de la segunda guerra mundial, los V2 se utilizaron para la prospección de la alta atmósfera, reemplazando la ojiva explosiva por un compartimiento de aparatos de medida. El resultado de las primeras experiencias permitió la construcción de cohetes mejor adaptados a estas necesidades: el *Viking*, el *Aerobee* o *Wac Corporal*, en los Estados Unidos, y el *Véronique*, en Francia. En otro dominio, se elaboraron numerosos cohetes destinados a los estudios aerodinámicos supersónicos en la atmósfera, especialmente en los Estados Unidos.

Las aplicaciones aeronáuticas de la propulsión por motor cohete empezaron a desarrollarse con los aviones experimentales norteamericanos *X1, X2, X5*, y el interceptor francés *Trident*. La técnica de los ingenios cohete progresa, a su vez, en todos los dominios, y en 1957 aparecieron los primeros cohetes intercontinentales de 8 000 km de alcance. En octubre de 1957 y febrero de 1958 fueron lanzados los primeros satélites artificiales soviético y norteamericano, respectivamente, por medio de cohetes de tres y cuatro *cuerpos* o *pisos*.

El motor cohete

La definición más clara de la propulsión por motor cohete la dio **Pascal** en 1660: "la presión del gas explosivo es ejercida sobre todas las paredes del recinto que lo contiene; las presiones sobre las paredes laterales se equilibran, pero, en cambio, la presión sobre la pared de un extremo es mayor que la que soporta la del otro, que lleva una abertura. Esta es la causa de que el cohete avance en sentido contrario al del escape de los gases". A esta definición debe añadirse que la propulsión por motor cohete es una propulsión de reacción anaerobia, puesto que lo mismo se produce dentro que fuera de la atmósfera; ocurre así porque el motor cohete no toma el oxígeno necesario para su funcionamiento del aire exterior, sino que, como los propulsores

aerobios, es alimentado a la vez por el carburante y el comburante que lleva a su bordo el ingenio del cual forma parte. Los motores cohete se dividen en dos grandes categorías según la naturaleza de estos elementos propulsores: los motores cohete de *combustibles sólidos* y los motores cohete de *combustibles líquidos*.

El motor cohete de combustible sólido. — Son motores cohete constituidos por un cilindro lleno de una mezcla homogénea de diversos cuerpos sólidos, unos ricos en oxígeno y otros combustibles, o bien que pueden descomponerse exotérmicamente durante la combustión. Se conocen, entre otros, la *pólvora negra* (carbón, azufre y salitre), las *pólvoras plásticas*, a base de nitroglicerina y nitrocelulosa, y la *pólvora de los cohetes J.A.T.O. (Jet Assisted Take Off:* despegue con ayuda de cohetes), que es una mezcla a base de asfalto y de perclorato de potasio. Para que la combustión sea regular, se dispone la mezcla sólida combustible en el propulsor en forma de cilindros, de toros cilíndricos o de cruces. Para que la superficie en combustión sea de sección constante, condición esencial para generar un empuje regular, se cubren las superficies de pólvora que no deben consumirse con inhibidores que impiden el progreso de la combustión por esas superficies. Los motores cohete de combustibles sólidos se utilizan sobre todo para la propulsión de los aparatos "aire-aire", a causa de su sencillez, o para la de otros más importantes que necesiten una fuerte impulsión durante un período de tiempo muy breve.

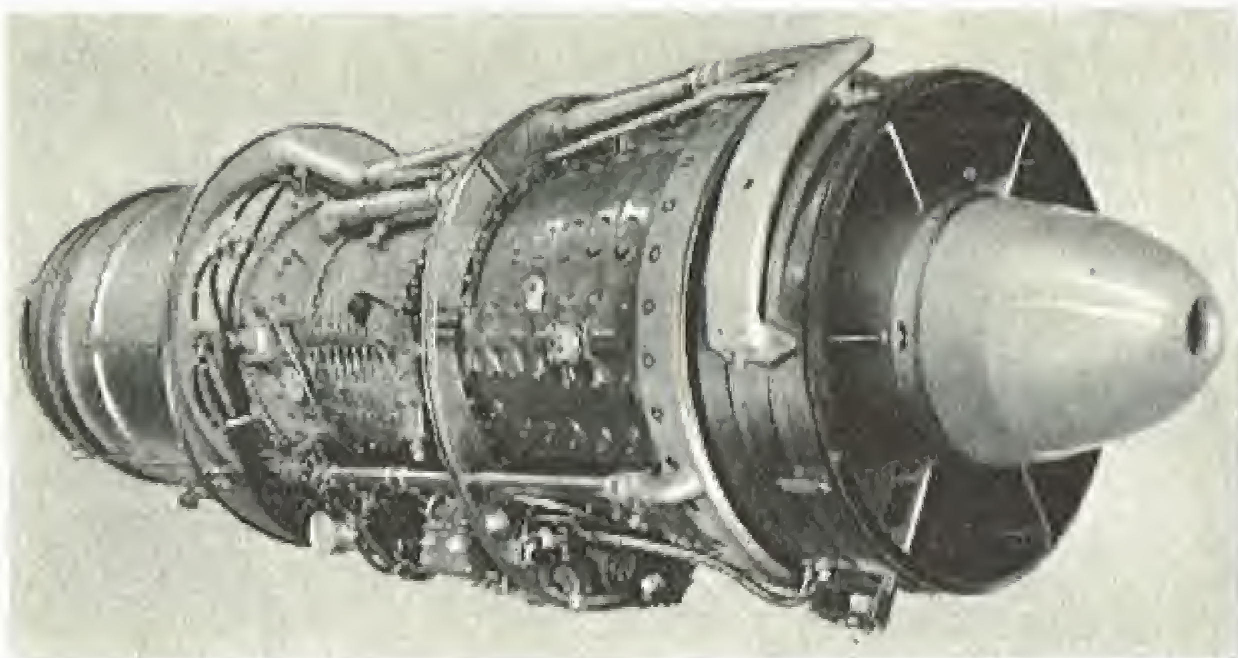
El motor cohete de combustible líquido. — La propulsión por cohete sólo ha progresado verdaderamente con la utilización de combustibles líquidos, cuyas inmensas posibilidades fueron demostradas por el precursor ruso **K. E. Tsiolkovski** (1857-1935), quien desde 1903 preconizaba ya el empleo del hidrógeno y el oxígeno líquidos. Sin embargo, este nuevo modo de propulsión no empezó a desarrollarse hasta 1926, época en que el eminente científico norteamericano **R. H. Goddard** (1881-1945) lanzó, en el desierto de Nuevo México, el primer cohete con combustible líquido. Entre los cohetes con combustibles líquidos se distinguen dos grandes categorías: aquellos cuya tobera es alimentada por un solo líquido (o por una mezcla de dos líquidos en el mismo depósito) llamado *monergol* (o *catergol*, si la reacción exotérmica es acelerada por un catalizador) y la que utiliza dos líquidos llamados *diergoles*. En este caso, uno de los diergoles es un *comburante* que aporta el oxígeno necesario para la combustión del *carburante* constituido por el segundo *ergol*. La reacción de combustión en la tobera puede desencadenarse por la simple mezcla de los diergoles *(diergoles hipergólicos)*, o bien cebarse por medio de un dispositivo especial, cuando los *diergoles* son *no hipergólicos*. Los principales *ergoles* o *propergoles* que se emplean en los motores cohete de combustibles líquidos son el agua oxigenada, el oxígeno líquido y el ácido nítrico, como comburentes, y el petróleo, la anilina, la xilidina y el alcohol o el hidrógeno líquido como carburantes. Los ergoles son enviados a presión a la cámara de combustión, ya por bombas autónomas o impelidas por una toma de movimiento auxiliar, ya por la presión de un gas como el nitrógeno, el aire o el helio. Todos estos combustibles citados son combustibles químicos, pero los viajes interplanetarios necesitarán probablemente el empleo de cohetes con combustibles nucleares (v. ASTRONÁUTICA, pág. 226).

Fig. 620. — El avión-cohete Douglas X-15 (*Fot. U. S. I. S.*)

Conducción del cohete

En la conducción de un cohete durante su vuelo pueden distinguirse tres operaciones fundamentales: el control de su posición, la navegación y el pilotaje. El control de posición permite mantener contacto con el cohete y precisar, en todo momento, su posición con respecto a otro móvil del espacio o a un punto del suelo. La navegación consiste en hacer que el cohete siga una trayectoria prefijada, y el pilotaje en la transmisión y recepción por el cohete de determinadas órdenes y su realización por los mecanismos del ingenio. Cuando estas tres operaciones son efectuadas por un operador humano situado fuera del cohete —en tierra o a bordo de un avión—, la conducción se llama *teleconducción* o conducción a distancia, y si se efectúan automáticamente mediante aparatos situados a bordo del cohete, sin ningún o casi ningún contacto con dispositivos situados en tierra, se llama *autoconducción*.

Teleconducción. — La primera forma elemental de conducción es la *teleconducción a la vista*, también llamada *teleconducción directa*. El cohete está siempre dentro del campo visual del operador, ya porque éste permanezca en un emplazamiento fijo en el suelo (caso del lanzamiento de cohetes anticarros), ya porque se desplace a bordo



Turborreactor *Olympus* (*Fot. Bristol Aeroplane Company*)

de un avión (caso de las bombas teledirigidas o de los cohetes de ataque aéreo). El operador transmite sus órdenes al cohete por medio de ondas radioeléctricas —*radioconducción*, o bien, para muy cortos alcances, por medio de impulsiones eléctricas con un hilo fino que va desarrollándose durante el vuelo del cohete (como en los cohetes franceses SS [y AS] 10, 11 y 12). Para la teleconducción de un cohete de alcance superior al óptico, hay que utilizar la *teleconducción indirecta*, controlando constantemente su posición en el espacio por medio de un radar o de cualquier otro dispositivo radioeléctrico de localización; en este caso, las órdenes para el cambio de dirección se transmiten siempre por radio.

Autoconducción. — Un cohete militar puede dirigirse contra un blanco sin necesidad de intervención exterior, detectando, por ejemplo, la radiación infrarroja que emite dicho blanco: es la *autoconducción directa*, cuyo dominio de utilización es muy restringido. Para que sea posible una autoconducción a larga distancia, un cohete debería poder captar las informaciones y órdenes de una cadena de conducción radioeléctrica comparable a las que utilizan para la navegación los aviones transatlánticos (la cadena Decca, Loran, etc.). En este sistema de autoconducción indirecta, las indicaciones de las cadenas son comparadas, por los aparatos automáticos situados a bordo del cohete, con las coordenadas de la trayectoria fijadas en función del objetivo que se tiene que alcanzar; cuando se comprueba una desviación, se pone en funcionamiento un mecanismo automático que actúa sobre los órganos de dirección. Como estos dispositivos pueden probablemente ser perturbados, en caso de guerra, por el enemigo, se han elaborado o están en estudio métodos de *autoconducción absoluta:* la *autoconducción astronómica* o *radioastronómica*, que, al captar la luz o las emisiones radioeléctricas de un punto del cielo, permite determinar la posición exacta en el espacio del cohete; la *autoconducción giroscópica*, mediante dos giróscopos que se mantienen paralelos a una dirección fija del espacio, o la *autoconducción por inercia*, con tres giróscopos que se utilizan como acelerómetros y proporcionan a dos integradores montados en serie los valores de las aceleraciones en tres direcciones distintas.

Las diferentes clases de cohetes

Independientemente de su modo de propulsión, existen dos grandes categorías de cohetes: los *cohetes sencillos* y los *cohetes múltiples* o *cohetes de secciones*. El cohete simple está constituido por un solo conjunto de motor cohete, depósitos y carga útil, mientras que el cohete múltiple consta de varios cohetes simples de peso decreciente, situados uno a continuación de otro, con el más potente de ellos en la base; cuando el carburante de una de las secciones de propulsión está a punto de agotarse, ésta se desprende automáticamente del conjunto y entra en funcionamiento el cohete situado inmediatamente encima. El cohete final adquiere una velocidad final mucho mayor que la que podría alcanzar un cohete simple que hubiera consumido la misma cantidad de carburante; en efecto, no tiene que arrastrar el peso muerto de los depósitos vacíos ni los pesados propulsores de las restantes secciones, y además ha aprovechado la velocidad que le han comunicado estas otras secciones. Estos cohetes de secciones son los que permiten lanzar los satélites artificiales.

Los cohetes se utilizan para la investigación. Las grandes velocidades de desplazamiento en atmósfera real obtenidas por los cohetes permiten experimentaciones directas de maquetas o de alas, en condiciones que sería difícil, o casi imposible, realizar en túneles aerodinámicos.

Los *cohetes sonda* han permitido, antes del lanzamiento de los satélites artificiales, conocer las propiedades físicas o químicas de las capas superiores de la atmósfera, e incluso de las regiones inmediatamente superiores. El cohete francés *Véronique* ha ascendido a 220 km, y son numerosos los cohetes americanos que han alcanzado alturas comprendidas entre 300 y 400 km, entre ellos los *Viking*, *Aerobee* y *Wac Corporal;* en 1957, un cohete del programa *Far-Side* norteamericano llegó a 6 400 km de altura.

Los cohetes militares son múltiples y, por esta razón, se les clasifica en función, por una parte, de su lugar de lanzamiento, y por otra, de su objetivo: así, un cohete "tierra-aire" es el que se lanza desde el suelo contra un objetivo situado en el aire. Se distinguen así los siguientes cohetes:

1º Los cohetes "tierra-tierra" y "tierra-aire", que se lanzan desde el suelo, respectivamente, contra objetivos situados también en el suelo o en el aire;

2º Los cohetes "aire-aire", "aire-tierra" y "aire-aguas submarinas", que se lanzan desde un avión contra cualquier tipo de ingenio aéreo, contra un objetivo en tierra o contra un sumergible;

3º Los cohetes "mar-aire", "mar-mar", "mar-tierra" o "mar-aguas submarinas", que se lanzan desde un navío contra, respectivamente, un avión o aeronave de otro tipo, contra otro navío, contra un objetivo en tierra o contra un submarino. Estos cohetes llevan dispositivos especiales que los distinguen de los cohetes lanzados desde el suelo, a causa de la estabilización que necesitan en el momento de su partida desde un navío, que no está casi nunca rigurosamente inmóvil;

4º Los cohetes "aguas submarinas-tierra", "aguas submarinas-aire" y "aguas submarinas-aguas submarinas", que se lanzan desde un submarino sumergido contra un objetivo en tierra, un avión o cualquier otro submarino sumergido.

Se distinguen, además, entre los cohetes y otros ingenios "tierra-tierra", los de alcance medio —del orden de 1 500 a 3 000 km— y los ingenios intercontinentales, que llegan por lo menos hasta 8 000 km.

En 1930 se hicieron ensayos, principalmente en Alemania y Austria, con *cohetes postales*. En 1962, el servicio de correos y telecomunicaciones francés realizó una serie de ensayos con un nuevo cohete postal. En el estado actual de la técnica, es probable que estos cohetes postales hagan de nuevo su aparición para el transporte del correo, en unas horas, por encima de los océanos, hasta que llegue la hora de los *cohetes de transporte para pasajeros* y de los *cohetes interplanetarios*.

Astronáutica

Reseña histórica. Vuelos espaciales. Satélites artificiales. Motores cohete nucleares. Hacia la conquista del espacio. La vida del hombre en el espacio

Reseña histórica. — La conquista del espacio ha constituido siempre una tentación para el hombre, y desde la más remota Antigüedad se han sugerido los más extravagantes procedimientos para llegar a este fin. Escritores como **Julio Verne** *(De la Tierra a la Luna)* [1865] y *(Viaje alrededor de la Luna)* [1870] o el inglés **H. G. Wells** *(Los Primeros Hombres en la Luna)* [1901] han contribuido mucho, aunque indirectamente, a la comprensión de la astronáutica por el público.

En el plano científico, la historia de la astronáutica es paralela, en gran parte, a la de los cohetes (v. p. 211), ya que casi todas las investigaciones sobre cohetes han tenido como objetivo final la conquista del espacio.

El 29 de julio de 1955, James C. Hagerty, secretario de Prensa de la Casa Blanca, anunció, en nombre del presidente Eisenhower, que la participación norteamericana en el Año Geofísico Internacional 1957-1958 comprendería el envío de satélites artificiales alrededor de la Tierra. Dos días más tarde, los científicos soviéticos Sedov y Ogorodnikov declararon que la U. R. S. S. proyectaba también el envío de un satélite al espacio.

El primer satélite artificial de la Tierra se lanzó el 4 de octubre de 1957 desde la U.R.S.S.: evolucionó entre los 270 y 930 km de altura, desintegrándose el 4 de enero de 1958, después de haber efectuado 1 350 rotaciones alrededor de la Tierra. El 3 de noviembre de 1957 se lanzó el segundo satélite soviético, que llevaba a bordo una perrita destinada a proporcionar indicaciones sobre las posibilidades de supervivencia en el espacio. El 2 de febrero y el 17 de marzo de 1958 se lanzaron, respectivamente, los dos primeros satélites americanos: *Alpha 58* (o *Explorer I*) y *Beta 58*.

Las etapas posteriores más importantes de la astronáutica son, primeramente, el comienzo de la conquista de la Luna, por los soviéticos: lanzamiento de un cohete que cayó en la Luna el 14 de septiembre de 1959, y de un satélite circunlunar, el 4 de octubre de 1959, que obtuvo la primera fotografía del hemisferio oculto de la Luna. Siguieron a continuación los lanzamientos al espacio de los primeros seres humanos. El 12 de abril de 1961 fue lanzado el primer hombre, el soviético **Yuri Gagarin;** el 6 y 7 de agosto de 1961 lo fue **German Titov,** también soviético, que efectuó diecisiete revoluciones alrededor de la Tierra. Por su parte, en los Estados Unidos, después de los vuelos balísticos de **Shephard** y **Grissom,** el 5 de mayo y el 21 de julio de 1961, respectivamente, **Glenn** consiguió, en febrero de 1962, dar tres veces la vuelta a la Tierra a bordo de un satélite *Mercury*. La investigación espacial en los Estados Unidos, además de estudiar el planeta Marte por medio de sondas automáticas, inició un programa de experimentación con los lanzamientos de los cohetes *Apolo* y, el 16 de julio de 1969, *Apolo XI*, tripulado por **Neil A. Armstrong, Edwin E. Aldrin** y **Michael Collins,** emprendía su vuelo para efectuar uno de los viajes más transcendentales de la historia de la humanidad que permitiría por primera vez que dos hombres (Armstrong y Aldrin) pisasen el suelo lunar a las 21 h., 17 m. y 41 s. del 20 de julio. El 15 de noviembre del mismo año fue lanzada una segunda nave espacial conducida por **Charles Conrad, Alan Bean** y **Richard F. Gordon,** y cuatro días más tarde, a las 7 h. y 54 m., los dos primeros tripulantes aterrizaron en la Luna, en la que permanecieron más de 31 horas. El 11 de abril de 1970, *Apolo XIII*, debido a deficiencias en el sistema eléctrico, no pudo alcanzar su objetivo y los cosmonautas, valiéndose del módulo lunar, lograron regresar a la Tierra sanos y salvos. En enero y en julio de 1971 tienen lugar los lanzamientos de *Apolo XIV* y de *Apolo XV*. En este último los tripulantes disponen para recorrer el suelo lunar de un vehículo.

Vuelos espaciales. — En relación con el vuelo en la atmósfera, el vuelo en los espacios extraatmosféricos presenta dos características esenciales: la ausencia de resistencia aerodinámica y la disminución progresiva de la gravedad terrestre en función de la altura. Por consiguiente, la velocidad de un móvil que evoluciona en este medio ya no está sometida a ninguna limitación, y aumenta mientras funciona su propulsor. Además, el móvil conserva una velocidad casi constante cuando se detiene la propulsión y de ahí la posibilidad de viajar por el espacio sin gasto de carburante, así como, en particular, de crear satélites artificiales.

La *velocidad de liberación* es la velocidad mínima que es necesario comunicar a un móvil para que, partiendo de la superficie de un planeta, se aleje de él indefinidamente. La fórmula general del valor de esta velocidad es $V = 2gR$, donde g es la intensidad de la atracción del planeta y R su radio. En la superficie de la Tierra, la velocidad de liberación es 11,2 km/s. Cualquier móvil que se lance con una velocidad inferior a la de liberación no podrá nunca alejarse infinitamente, sino que describirá alrededor del planeta una órbita cerrada, en forma de una elipse más o menos alargada, de la cual uno de sus focos es el centro del planeta; si su velocidad es igual o mayor que la velocidad de liberación, el móvil se alejará hacia el infinito describiendo una rama de hipérbola o de parábola, siendo también el centro del planeta uno de sus focos.

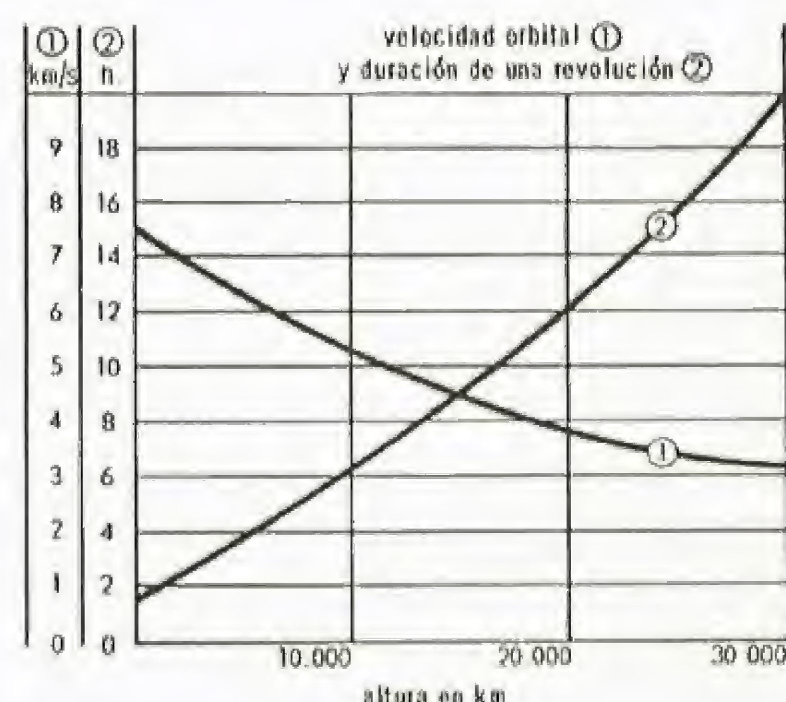


Fig. 621. — Variación de la velocidad orbital y de la duración de una revolución de un móvil en función de la altura

La intensidad de la gravedad disminuye en proporción inversa al cuadrado de la distancia. Si dicha intensidad, al nivel del suelo, es 9,81 m/s/s, a 38 000 km de altura, su intensidad será sólo la 50ésima parte. Para que un móvil pueda convertirse en un satélite artificial de la Tierra es necesario, pues, que su velocidad de rotación sobre su órbita, o *velocidad orbital*, cree una aceleración centrífuga igual y opuesta a la aceleración de la gravedad; de donde se deduce que la velocidad orbital varía en función de la altura y que a cada altura corresponde una velocidad orbital y sólo una. En el caso ideal de una órbita circular, la velocidad orbital es 27 800 km/h (7,73 km/s) a 300 km de altura; a 6 000 km, es sólo de 21 600 km/h (6 km/s), y a la distancia media de la Luna (384 000 km) esta velocidad orbital desciende a ... sólo 3 600 km/h (1 km/s), puesto que a esta distancia la intensidad de la gravedad es aproximadamente 4 000 veces menor que la que reina en la superficie de la Tierra (*fig.* 621).

Para la realización de viajes espaciales, la principal preocupación de los constructores de cohetes es la *relación de masa:* se llama así la relación entre la masa inicial del cohete dispuesto para el lanzamiento y su masa final, cuando se ha consumido todo el combustible. En el momento actual, los cohetes apenas sobrepasan una relación de masa de 3 (2/3 del peso total en combustible), lo que limita la velocidad final del cohete. Para aumentar esta última, es necesario utilizar cohetes múltiples (v. COHETES, pág. 212), en espera de la posibilidad de emplear los motores cohete nucleares *(v. infra)*.

Satélites artificiales. — No es posible colocar un satélite sobre una órbita alrededor de la Tierra lanzándolo con catapulta desde ésta. La primera condición que hay que cumplir para la puesta en órbita de un satélite artificial es lanzarlo por medio de un cohete cuya propulsión no se detenga hasta que no *haya salido de los límites de la atmósfera*. En efecto, según las leyes generales de la mecánica, un satélite describe una órbita que vuelve a pasar por el punto en que ha cesado la propulsión: por lo tanto, si este punto se sitúa en la Tierra o en la atmósfera, como en el caso de una propulsión demasiado corta, el satélite chocaría con las capas densas de la atmós-

fera y se desintegraría por combustión, lo mismo que una estrella fugaz. Para que el satélite pueda girar durante mucho tiempo alrededor de la Tierra, es necesario que la propulsión cese en un punto en que la presión atmosférica pueda considerarse como un factor despreciable.

Para la colocación del satélite sobre su órbita deben satisfacerse otras condiciones, relativas principalmente a la orientación de la velocidad final que se comunique al satélite y a la intensidad de dicha velocidad, llamada *velocidad orbital* (v. *supra*). Si se desea, en especial, que el satélite describa una órbita que se aproxime todo lo posible a una circunferencia, de forma que pueda observarse fácilmente desde la Tierra, es indispensable que la dirección del movimiento del satélite, en el momento en que cese la propulsión, sea rigurosamente perpendicular al radio que une en ese momento el satélite con el centro de la Tierra.

La fórmula que define la ley de disminución de intensidad de la gravedad es $g_z = g_0 \left(\frac{R}{R+z}\right)^2$, en la que g_0 y g_z designan, respectivamente, la intensidad de la gravedad al nivel del suelo y a la altura z, siendo R el radio terrestre, que es, aproximadamente, igual a 6 350 km. Dada esta relación, la velocidad orbital V_z y la duración T_z de una revolución a la altura z viene expresadas, en el caso ideal de una órbita circular, por las relaciones:

$$V_z = R \sqrt{\frac{g_0}{R+z}} \qquad T_z = \frac{2}{R} \sqrt{\frac{(R+z)^3}{g_0}}.$$

El lanzamiento de los actuales satélites artificiales ha podido realizarse por medio de cohetes de tres o cuatro *cuerpos* o *pisos*. En estos casos, ha correspondido a la primera planta del cohete la impulsión para el franqueo de la atmósfera por el conjunto del dispositivo, así como la necesaria para obtener una primera velocidad del orden de 6 000 a 8 000 km/h. La segunda planta, sin dejar de proporcionar al satélite un nuevo aumento de velocidad del mismo orden que el anterior, incurva su trayectoria de forma que tienda a hacerse paralela al suelo. Cuando la propulsión de este segundo cuerpo ha cesado, el satélite alcanza una altura próxima a la de su órbita por la inercia que ha adquirido; interviene en ese momento la propulsión de la tercera planta, que permite alcanzar la velocidad final que necesita el satélite para instalarse en su órbita y conseguir la inclinación ideal. En el caso de que el cohete portador sólo conste de tres cuerpos, como el cohete *Vanguard*, que lanzó el satélite norteamericano *Beta 58*, el satélite se separa de la última planta del cohete; si el cohete es de cuatro pisos, como el *Júpiter C*, que lanzó el *Alfa 58*, el satélite está constituido por el conjunto de la cuarta y última planta.

En el plano científico, actualmente las posibilidades de los satélites artificiales son innumerables. Refiriéndonos al programa del Primer Año Geofísico Internacional (1958), se ve que los satélites se utilizan para el estudio de las propiedades físicas y ópticas de la atmósfera, de las radiaciones ultravioleta, de los rayos X y de los corpúsculos emitidos por el Sol, de los rayos cósmicos, de los meteoritos, del magnetismo terrestre, etc. El simple estudio de la trayectoria de los satélites, incluso cuando éstos no pueden transmitir informaciones por radio sobre los fenómenos registrados a bordo, puede dar indicaciones sobre la densidad de la atmósfera a grandes alturas, por el estudio del frenado del satélite. La ventaja de los satélites sobre los cohetes de exploración es la enorme duración de sus observaciones de los primeros, que puede llegar a durar varios meses o varios años.

Motores cohete nucleares. — Para los viajes interplanetarios, sólo puede recurrirse, en el estado actual de la técnica, el empleo de motores nucleares. Las ventajas principales de la propulsión nuclear estriban en la disminución de la relación de masa y en el aumento de las velocidades de eyección. La relación de masa de un cohete nuclear será netamente inferior a la de los cohetes químicos actuales, a causa del poco consumo de estos motores cohete. Se considera, en efecto, que 100 g de combustible nuclear proporcionan tanta energía como 250 t de gasolina. En estas condiciones, la carga útil de tales cohetes será mucho mayor y la autonomía del vuelo a propulsión también. Como las velocidades de eyección serán muy elevadas, la velocidad final alcanzada por estos cohetes apenas tendrá límite. Pueden distinguirse dos categorías de cohetes nucleares: los *cohetes nucleares térmicos*, que llevarán combustible nuclear y una materia para lanzar, proporcionando el primero la energía necesaria para lanzar la segunda, y los *cohetes iónicos* o *fotónicos*, que lanzarán directamente los productos de fisión a una velocidad próxima a la de la luz. No obstante, los viajes interestelares a velocidades próximas a las de la luz necesitarán la utilización de nuevas fuentes de propulsión, que se descubrirán probablemente al explorar el espacio.

Hacia la conquista del espacio. — La propulsión a reacción, unida a la energía nuclear, permitirán los viajes más lejanos que puedan hoy imaginarse. El primer objetivo de la astronáutica, después de la reciente realización de los satélites artificiales, ha sido el envío de un cohete a la Luna, y después, de otro alrededor de la Luna. Este programa ha podido realizarse por medio de cohetes con combustibles líquidos, pero la energía nuclear será indispensable, sobre todo si se desea enviar en ellos una tripulación humana.

Hay dos métodos de vuelo, completamente diferentes, para realizar un viaje interplanetario. El primero consiste en efectuar el *vuelo a velocidad constante*, que requiere un menor consumo de carburante, puesto que basta con que el cohete abandone la zona de atracción terrestre para que, parados entonces sus motores, continúe su vuelo en el espacio, en el que nada se opone a su movimiento.



Modelo del satélite artificial *Béta 58* en materia plástica (*Doc. del Centro cultural norteamericano*)

La segunda técnica, poco empleada, es la del *vuelo de aceleración constante*: durante toda la duración del viaje, se mantiene en funcionamiento un propulsor; durante la primera mitad del trayecto, acelera constantemente la velocidad, y durante la segunda mitad —cuando el regreso del cohete—, produce el frenado gradual hasta el momento en que el cohete toma contacto con el suelo del planeta.

El vuelo a velocidad constante puede realizarse para las cortas distancias, incluso con una tripulación humana, mediante cohetes con combustibles químicos del mismo tipo, pero más potentes que los que se utilizan actualmente.

El vuelo a aceleración constante presenta todavía mayor interés para las distancias muy grandes, pero esto sólo puede concebirse con un cohete nuclear que pueda reunir una autonomía de funcionamiento y un peso total en vuelo lo suficientemente pequeño para que pueda realizarse según las técnicas actuales.

La vida del hombre en el espacio. — Como el objeto de la astronáutica es enviar hombres a los espacios interplanetarios o interestelares, es necesario estudiar las condiciones de vida que en ellos podrán encontrar y preocuparse de las mismas; hasta ahora, el conocimiento de las grandes alturas estaba limitado a las de 20 y 30 km sobre la Tierra. Gracias a los satélites artificiales, este conocimiento se ha ampliado casi ilimitadamente.

Las condiciones que más pueden influir sobre la fisiología del viajero del espacio son: la *aceleración*, las *radiaciones cósmicas*, la *falta de gravedad* y la *vida en un recinto limitado*. Con respecto a la *aceleración*, será necesario, tanto en el momento de despegue como en el de aterrizaje de los cohetes, velar porque no se sobrepase el máximo aceptable para el hombre. Ahora bien, estos máximos se han estudiado con cuidado desde hace numerosos años por los centros medicofisiológicos de la aviación (v. AVIACIÓN, pág. 210). Los conocimientos actuales sobre los *rayos cósmicos* no nos permiten todavía afirmar su nocividad o, al contrario, su pasividad con respecto al cuerpo humano. Los estudios en curso, sobre todo valiéndose del envío de animales a bordo de los satélites artificiales, nos informarán sobre este punto y permitirán finalmente encontrar la "pantalla" protectora ideal. La *carencia de gravedad* puede originar en el hombre ciertos vértigos, y privarle de sus reflejos y de la coordinación de sus movimientos. No parece, en cambio, que sea imposible vivir durante un período de tiempo prolongado en un espacio sin gravedad. Por otra parte, como es probable que, para los grandes viajes interplanetarios, el vuelo se efectúe a aceleración constante, volverá a crearse, por esta causa, una gravedad artificial. En cuanto a la *vida en un recinto limitado*, ya se han encontrado soluciones en los casos de los submarinos modernos que permanecen sumergidos varios meses. Las mismas soluciones, o soluciones muy semejantes, podrán utilizarse a bordo de las astronaves del futuro.

El estudio de las condiciones de vida a bordo de los primeros satélites artificiales habitados que, tanto en los Estados Unidos de América como en la U. R. S. S., han permitido al hombre efectuar algunas incursiones más allá de la atmósfera terrestre, ha conducido al perfeccionamiento de sistemas autónomos de supervivencia. Las últimas fases, que consistieron en el envío de seres humanos alrededor de la Luna y después a la propia Luna, para ir estudiando la posibilidad de instalar una base lunar, permitieron aumentar todavía más los conocimientos en este terreno.

Puede decirse, en conclusión, que, dentro de algunos años, el hombre podrá lanzarse a la conquista de los espacios interplanetarios. En efecto, los obstáculos que se oponen todavía a ello han sido vencidos casi todos, y las experiencias en curso permiten pensar que los que quedan por vencer serán pronto superados.

Jean PELLANDINI

Telecomunicaciones

Telegrafía

Reseña histórica. Principio de la telegrafía eléctrica. Fuentes eléctricas. Líneas telegráficas. Telégrafo Morse. Manipulador o transmisor. Receptor. Telégrafo Hughes. — **Telegrafía múltiple:** Transmisiones simultáneas. Transmisiones múltiples. Aparato Baudot. Código Baudot. Teletipos, telescriptores o teleimpresores. — **Telegrafía submarina:** Reseña histórica. Principio y dispositivos

Reseña histórica. — La telegrafía, o arte de transmitir a distancia señales convencionales, fue utilizada en todas las épocas de la Antigüedad: señales de fuego en los tiempos bíblicos; semáforos de las torres de los griegos, que comunicaban frases completas; sistema telegráfico, a grandes voces, de los galos, etc.

Las primeras instalaciones telegráficas verdaderamente prácticas se deben al abate **Claude Chappe** (1763-1805), quien, después de haber tratado de construir un telégrafo eléctrico y luego otro acústico, inventó un curioso aparato de dos brazos. En 1793, Chappe obtuvo autorización para construir la línea París-Lille; terminada ésta en marzo de 1794, anunció el 15 de fructidor del Año II (1 de septiembre de 1794) la toma de Condé a los austriacos, tras lo cual la Convención le nombró director de Telégrafos. En 1844, en el momento de la instalación de la primera línea eléctrica París-Ruán, la red aérea francesa tenía ya 5 000 km de longitud.

El *empleo de la electricidad* permitió, gracias a su modo de propagación, transmitir las señales casi instantáneamente. El primer telégrafo eléctrico data de 1774 **(Lesage,** en Ginebra). Después se utilizaron las pilas, y **Ampère,** en 1820, propuso utilizar en telegrafía la desviación de la aguja imantada por la acción de la corriente eléctrica.

El primer dispositivo que inscribió señales sobre una banda de papel fue el aparato de Steinheil (Munich, 1837). Efectuando experiencias con su aparato, **Steinheil** descubrió la función de la Tierra como conductor, descubrimiento que permitió suprimir desde entonces el hilo de retorno. El mismo año, **Morse** (1791-1872) hizo patentar su electroimán, y en 1843 construyó su primer aparato, del cual derivan, más o menos, todas las instalaciones actuales.

Principio de la telegrafía eléctrica. — En la estación emisora se cierran o abren circuitos con arreglo a un código convenido; en la estación receptora, un electroimán, excitado por esta corriente, atrae o deja sin atraer una armadura provista de un estilete que traza, sobre una banda móvil de papel, puntos y rayas.

Fuentes eléctricas. — Las fuentes de electricidad más utilizadas en telegrafía son las pilas Daniell y Callaud, y, algunas veces, la pila Bunsen; la pila Leclanché se utiliza en las estaciones poco importantes y de funcionamiento intermitente.

En París, en el despacho central de Telégrafos, se utilizan acumuladores cargados por dinamos. La intensidad de la corriente utilizada es del orden de 1 a 3 centésimas de amperio.

Líneas telegráficas. — Las líneas telegráficas que enlazan las estaciones pueden ser aéreas, subterráneas, subfluviales o submarinas.

Las líneas aéreas enlazan las estaciones por medio de un cable metálico fijado a postes mediante aisladores. Los cables son de hierro galvanizado o de bronce fosforado, que es mejor conductor que el hierro. Los aisladores son campanas de porcelana o de vidrio, que se fijan a los postes de madera o de metal; las líneas subterráneas, que se utilizan principalmente para atravesar las ciudades, están formadas por un conductor de cobre aislado con gutapercha y rodeado de alambre alquitranado; para proteger los cables contra los choques exteriores, se envuelven en una funda de plomo o en una o varias bandas de acero. Estos cables se colocan en los alcantarillados o en postes especiales. Las líneas subterráneas son cables de cobre rodeado de un buen aislante, y sostenidos por cables de acero.

Telégrafo Morse. — Este aparato transmite señales consistentes en signos largos o cortos, llamados rayas y puntos. La duración de la raya equivale a la de tres puntos. El intervalo entre dos señales, a un punto; entre dos letras, a tres puntos, y entre dos palabras, a cinco puntos.

Manipulador o transmisor. — Consta de una palanca, móvil alrededor de un eje, que se mantiene en su posición por medio de un muelle; un tope comunica con la pila, y el eje con el hilo de línea, ligado a la Tierra, a su salida del receptor, en la estación de llegada. Al apoyar sobre la palanca, ésta entra en contacto con el tope y el hilo de línea es atravesado por una corriente. Según la duración de este contacto, se obtienen emisiones largas o breves, o sea rayas y puntos.

Receptor. — Consta de un electroimán, delante del cual se coloca una palanca de hierro dulce, móvil alrededor de un punto. El hilo del electroimán comunica por un lado con el hilo de línea y por el otro con la Tierra. La extremidad de la palanca puede apoyarse sobre una banda de papel que va desenrrollándose continuamente; al pasar la corriente, la palanca es atraída por un electroimán. La otra extremidad se apoya sobre la banda de papel e imprime sobre ella una raya o un punto por medio de una moleta que lleva tinta de imprenta.

Telégrafo Hughes. — Imprime directamente sobre una banda de papel las letras del alfabeto: permite una gran rapidez de transmisión, pero su mecanismo es complicado. El transmisor y el receptor son iguales y las señales se transmiten por medio de un teclado, cuyas teclas corresponden cada una a una letra, a un signo o a una cifra.

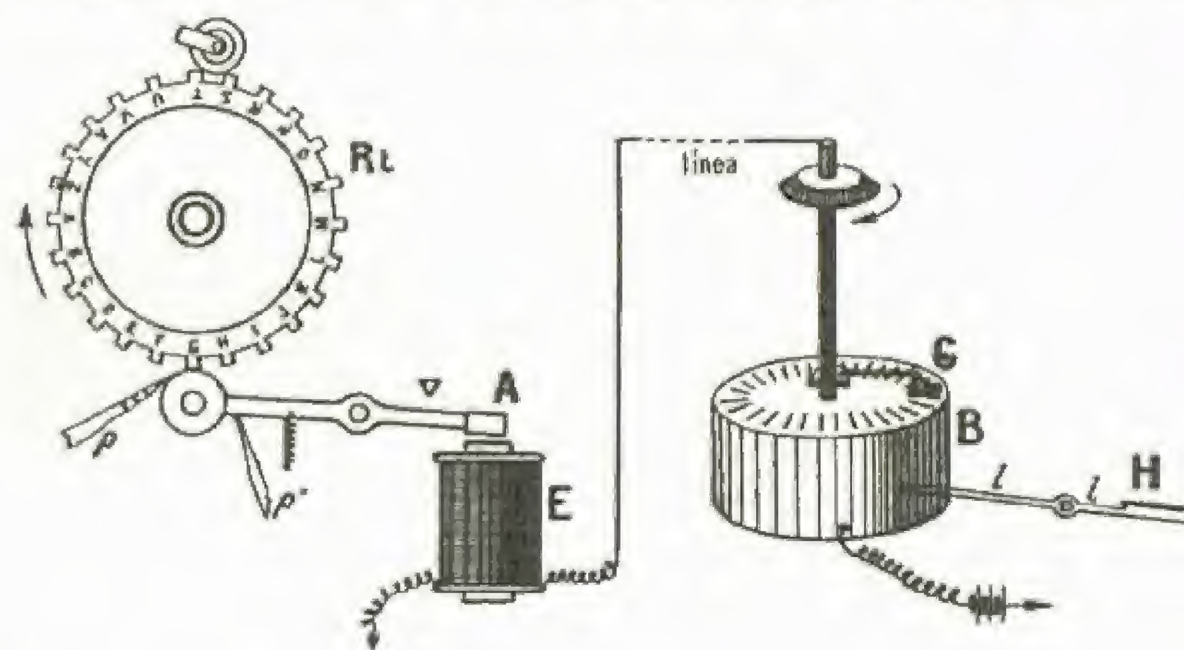


Fig. 622.—H, tecla del teclado; *l*, palanca; B, caja cilíndrica; G, pasador; E, electrorreceptor; A, armadura; *Rt*, rueda de los tipos; *p*, *p'*, banda

Las letras, cifras y signos están en relieve sobre ruedas (ruedas de los tipos). El sincronismo entre las estaciones es obtenido por medio de un regulador que imprime a cada aparato una velocidad constante; además, un sistema corrector rectifica, a cada impresión, la posición de las ruedas de los tipos receptores.

Un brazo gira con movimiento uniforme sobre una caja cilíndrica en la que se encuentran veintiocho clavijas que corresponden a las teclas del teclado (*fig.* 622). Cuando se apoya sobre una tecla, se levanta la clavija o pasador correspondiente, haciendo bascular al carro, que crea entonces un contacto que establece la corriente; esta corriente acciona en la estación receptora el electroimán, que a su vez proyecta la banda de papel sobre la rueda de los tipos, que, girando sincrónicamente con el carro, presenta la letra deseada frente a la banda de papel.

Telegrafía múltiple

Desde mediados del siglo XIX se ha tratado de aumentar el rendimiento de las líneas telegráficas: los procedimientos utilizados son los sistemas simultáneos y los sistemas múltiples.

Transmisiones simultáneas. — Si se transmiten simultáneamente por un mismo hilo dos telegramas en sentido inverso desde dos estaciones correspondientes, el sistema se llama *duplex*. Si dos estaciones transmiten a una tercera en el mismo sentido, el sistema es entonces *diplex* (*fig.* 623). Haciendo duplex un sistema diplex se consigue una transmisión *cuadruplex* que permite enviar simultáneamente dos telegramas en cada sentido entre dos estaciones correspondientes.

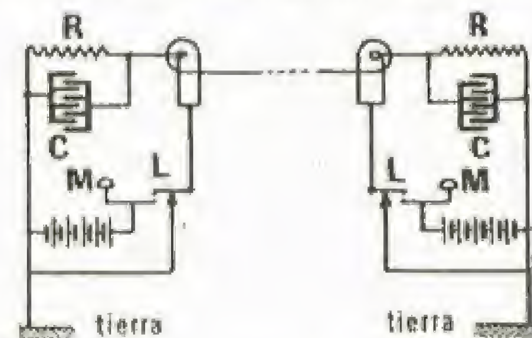


Fig. 623.—Telégrafo diplex diferencial: R, resistencia; C, capacidad; L, palanca; M, manipulador doble

La telegrafía *múltiple* tiene por objeto transmitir varios telegramas simultáneamente, y en el mismo sentido, por un mismo hilo; para ello se utilizan corrientes de naturalezas diferentes.

En la actualidad, para obtener transmisiones simultáneas y numerosas, se utiliza el sistema de corrientes portadoras, que se describirán más adelante en *Telefonía.*

Transmisiones múltiples. — En las transmisiones múltiples, se produce un "tiempo muerto" apreciable entre dos señales consecutivas emitidas por un mismo transmisor. La telegrafía múltiple aprovecha estos intervalos para otras transmisiones. Los diferentes operadores o transmisores automáticos solamente tienen línea, a cada señal, el tiempo

estrictamente necesario para la transmisión eléctrica de dicha señal. La repartición de la línea, a la salida y a la llegada, entre los diferentes operadores, se efectúa por medio de distribuidores, que deben conservar un sincronismo riguroso.

Aparato Baudot. — Ideado por Baudot en 1874, está compuesto de un *transmisor* (*fig.* 624) que tiene un teclado de cinco teclas unidas a las cinco clavijas de un distribuidor recorrido por frotadores. Los contactor de estas teclas, en reposo, están empalmados por el polo negativo de una pila, y los contactos de trabajo con el polo positivo. Una letra está formada por el descenso simultáneo de determinadas teclas,

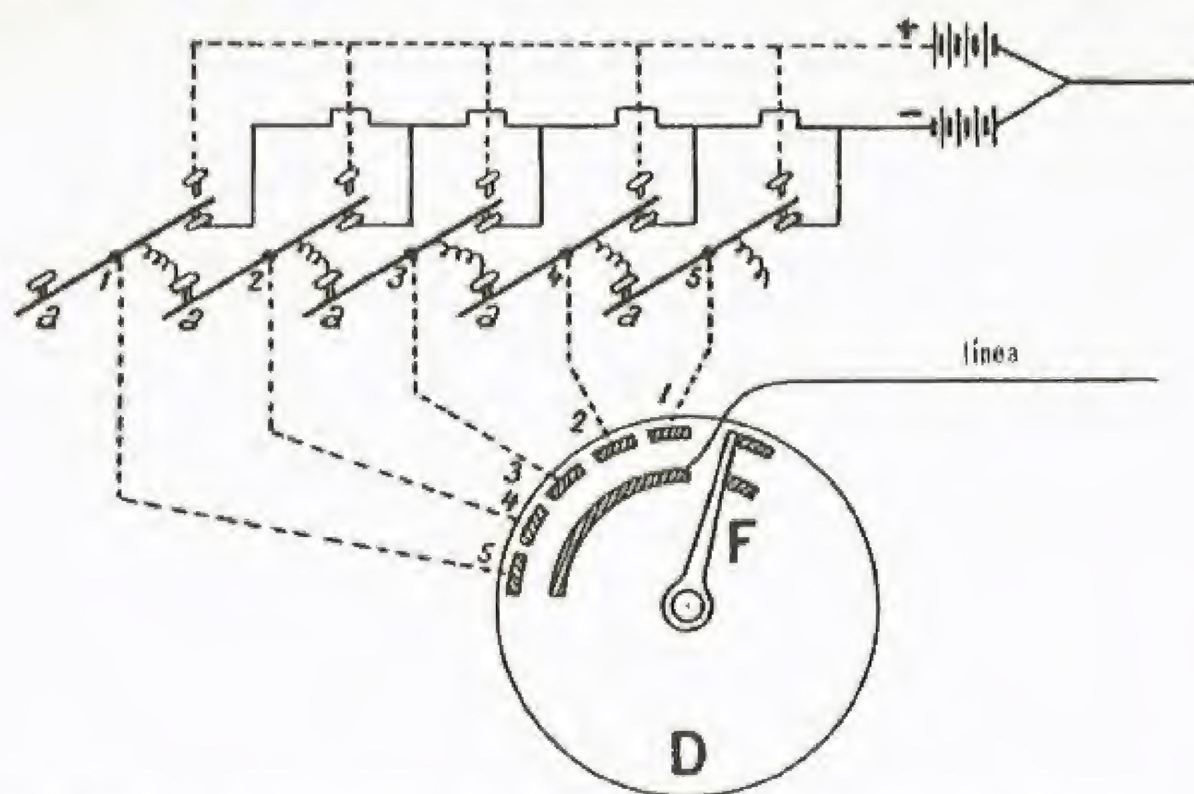


Fig. 624. — Mecanismo de transmisión del sistema Baudot: *a*, teclas; D, distribuidor; F, frotador; 1, 2, etc., conexiones

es decir, por una combinación de emisiones positivas y negativas que los frotadores se encargan de enviar a la línea. En la estación receptora (*fig.* 625), un distribuidor idéntico al de la estación emisora es recorrido por frotadores que giran sincrónicamente con los del puesto transmisor. Por lo tanto, los frotadores se encuentran en cada momento en la misma posición relativa con respecto al distribuidor, y recorren en cada momento cada una de las clavijas de cada sector. En la recepción, las cinco clavijas de un sector están en relación con electroimanes rápidos de recepción, por lo cual la combinación formada en la salida se reproduce sobre estos electroimanes en la llegada, y

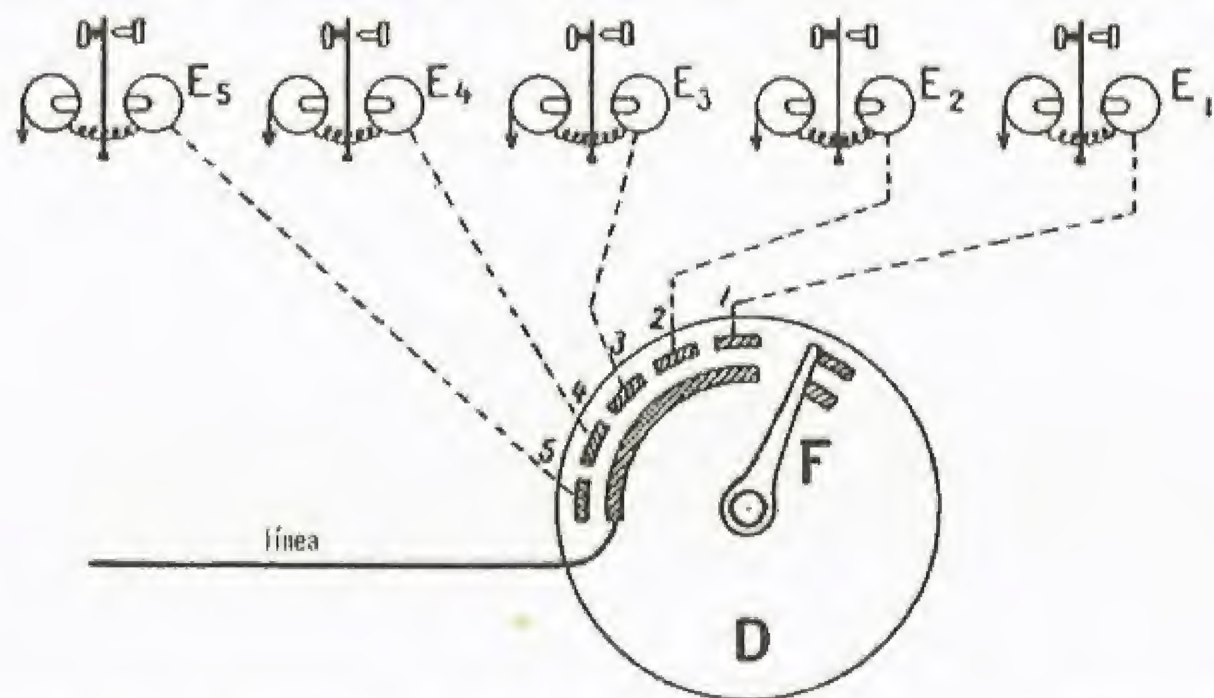


Fig. 625. — Mecanismo de recepción del sistema Baudot: E_1, E_2, etc., electroimanes receptores

queda inmediatamente registrada. Después, se traduce en caracteres de imprenta mediante un mecanismo especial llamado *traductor*. Mientras que el traductor imprime una señal, los frotadores recorren otros sectores del distribuidor; hay tantos sectores como comunicaciones múltiples (cuatro en una instalación cuádruple).

Código Baudot. — Las señales se forman emitiendo cinco corrientes sucesivas de la misma duración, positivas o negativas. El número de combinaciones posibles así es de 2^5, o sea 32; un dispositivo de inversión permite aumentarlas hasta 64, sustituyendo una serie de caracteres por otra. Una de las series compone las letras del alfabeto y la otra las cifras y los signos de puntuación.

Para no tener que recurrir a operadores que manipulen, puede utilizarse un sistema de transmisión automática: una banda previamente perforada según el código Baudot, que pasa por un transmisor. También puede utilizarse a la llegada, para recibir el telegrama, un perforador.

El aparato Baudot es el más empleado en las instalaciones telegráficas; permite que varias ciudades unidas por un solo cable correspondan entre sí, como si cada una de ellas estuviera ligada con las demás por un cable distinto (puestos escalonados). Este aparato se utiliza en las relaciones internacionales. Un Baudot simple permite que el tráfico discurra a velocidades del orden de 50 palabras/minuto o 40 *bauds* (80 bauds, equivalen a 100 palabras/minuto).

Teletipos, telescriptores o teleimpresores. — Los aparatos de este género constan de los siguientes órganos esenciales: un teclado de máquina de escribir, para la composición del mensaje que hay que transcribir; un dispositivo selectivo destinado a formar la combinación de corrientes que transmiten cada letra, cifra o signo especial del teclado, y un dispositivo regulador destinado a mantener entre los aparatos puestos en relación un sincronismo más o menos preciso. La recepción de las señales se efectúa por medio de uno o varios electroimanes; la selección de combinaciones de corrientes elementales, por medio de un combinador o selector de llegada. Por último, un dispositivo impresor, construido por medio de palancas portacaracteres, como las de las máquinas de escribir, proyecta el carácter sobre el papel. En otros casos, una rueda de tipos presenta el carácter ante el papel. Con los teletipos se consigue una velocidad de cuarenta a cincuenta palabras/minuto.

Telegrafía submarina

Reseña histórica. — La idea del enlace telegráfico submarino se atribuye al profesor ruso **Soemmering;** después de los diversos ensayos de **Wheatstone** (1837 a 1840), de **O'Shaughnessy** (1839) y de **Morse** (1843), **Cornell** colocó el primer cable (1845) entre el fuerte Lee y Nueva York; en 1848, **Armstrong** colocó en el río Hudson, sumergiéndolo, el primer cable aislado con gutapercha. El primer cable aislado entre Francia e Inglaterra fue colocado en 1850, por la chalupa *Goliat*, pero hubo de ser abandonado porque se rompió durante la operación. Un segundo cable, que se colocó en 1851, está todavía en servicio. El primer cable transatlántico se colocó entre Terranova y Valentia (Irlanda) en 1858.

Principio y dispositivos. — En las líneas submarinas, el retraso en la transmisión es todavía mayor que en las líneas aéreas, ya que los cables se comportan como condensadores excelentes.

Para aumentar la rapidez y la claridad de la transmisión, se bloquea la línea, en sus dos extremidades, con condensadores; en el punto de partida se utiliza una fuente de la mayor tensión posible, a fin de reducir al mínimo las cargas de la línea, y a la llegada se utilizan aparatos sensibles de tipo galvanométrico, provistos de un brazo que inscribe las señales sobre una banda de papel que se desenrolla (sifón registrador)

Las señales utilizadas no se distinguen por su duración, como en el telégrafo Morse, sino por el sentido de la corriente, enviándose, después de una señal, una corriente adecuada en sentido inverso destinada a ayudar a la descarga del cable en cada emisión. La línea está aislada a su salida, y lleva un condensador a la llegada.

En el dispositivo Ader se utiliza un hilo conductor muy fino, tendido entre los polos de un fuerte imán; la corriente recibida atraviesa este hilo, que se desplaza hacia uno cualquiera de los polos del imán; los movimientos vibratorios de este hilo se fotografían.

La colocación y la conservación de los cables exige la construcción de navíos especiamente acondicionados, llamados *cableros*.

Telefonía

Reseña histórica. Micrófono. Receptor telefónico. Corrientes telefónicas. Líneas telefónicas. Telefonía por corriente portadora. Líneas intercontinentales. — **Organización del teléfono. Conmutación:** Conmutación manual. Centrales. Cuadros. Cuadro con batería local. Cuadro con batería central. Múltiple. Conmutación automática. Cuadrante de llamada. Diversos sistemas de telefonía. Automáticos rurales

Reseña histórica. — El teléfono fue inventado al mismo tiempo, en 1876, por **Graham Bell** (1847-1922) y **Elisha Gray** (1835-1901).

En 1837, **Page** y **de La Rive** (1801-1873) comprobaron que el hierro emitía un sonido cuando se le sometía a la acción de un campo magnético variable; en 1854, **Bourseul** (1829-1912) señaló el principio del teléfono eléctrico: una placa móvil, interpuesta en un circuito que fuese interrumpido por las vibraciones acústicas de esta misma placa, podía engendrar sin duda una corriente que, al actuar a distancia sobre otra placa móvil, podía permitir lógicamente reproducir la palabra que había determinado las vibraciones de la primera placa.

Hacia 1861, el alemán **Philippe Reiss** consiguió que se oyeran cantos a distancia, y llamó a su aparato *teléfono;* este aparato, al no poder reproducir el timbre ni la intensidad del sonido, no podía transmitir la voz humana, lo que consiguió después Graham Bell, en Boston, en 1876. El aparato de Bell era, a la vez, receptor y emisor, y estaba constituido por un imán permanente, al cual se había arrollado un hilo; su placa era una membrana de hierro dulce.

Uniendo con dos hilos conductores los devanados de los imanes de dos aparatos de esta clase, se obtenía un circuito telefónico; las vibraciones de la voz desplazaban la membrana de hierro dulce produciendo una variación de flujo que originaba, en virtud de la ley de Lenz, una corriente en el circuito. Esta corriente ocasionaba el desplazamiento de

la armadura del aparato receptor, que reproducía los mismos movimientos, y, por consiguiente, el sonido, que se habían producido ante el aparato emisor.

La membrana de hierro dulce, cuyos movimientos eran de poca amplitud, hacía que este telégrafo sólo alcanzase unos cuantos centenares de metros; se tuvo entonces la idea de insertar el receptor en un circuito en serie con una fuente de corriente continua y una resistencia variable, llamada *micrófono*, cuyas variaciones provocaban cambios de flujo en el electroimán.

Micrófono. — **Edison,** en 1877, construyó un transmisor que constaba de una pastilla de carbón comprimida por una lámina vibrante que se intercalaba en un circuito, alimentado por una pila, en el cual había un receptor Bell. **Hughes** (1831-1900) construyó, en 1878, un transmisor muy sensible, que estaba compuesto de un lápiz vertical de carbón sostenido entre dos soportes también de carbón. El lápiz vibraba bajo el efecto de la voz y producía corrientes ondulatorias. Este aparato fue perfeccionado, pero los micrófonos de todos los modelos derivados de este transmisor de Hughes adolecían del mismo defecto: insuficiencia de puntos de contacto (**Ader, d'Arsonval** [1850-1940], etc.).

Los micrófonos que se utilizan actualmente (*fig.* 626) son de granalla. Se obtiene una gran multiplicidad de contactos utilizando carbón dividido y comprendido entre dos electrodos, uno de los cuales está constituido por la membrana vibrante o es solidario de ella. Para evitar amontonamientos, se coloca la granalla en cubetas de carbón que tienen alvéolos o estrías.

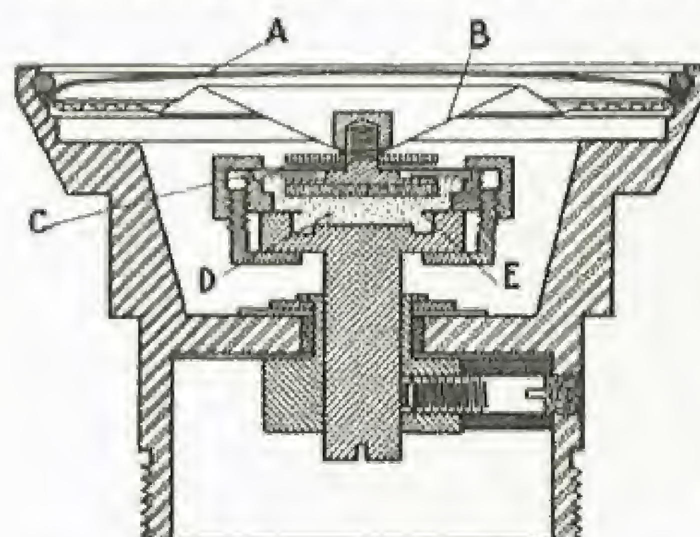


Fig. 626. — Cápsula del micrófono: A, tapadera perforada; B, diafragma pulimentado; C, papel parafinado; D, grafito; E, mica

La transmisión de la palabra a grandes distancias ha sido posible gracias, más que al micrófono, al invento de los transformadores, ya que las variaciones de resistencia del micrófono sólo son apreciables comparándolas con la resistencia propia del circuito exterior (línea-receptores). Si en serie con el micrófono se instala el primario de un pequeño carrete de inducción, estando ligado el secundario en serie con la línea y los receptores, las variaciones de la resistencia del micrófono bajo la acción de las ondas sonoras toman entonces una influencia preponderante.

Receptor telefónico. — Existen numerosos tipos de receptores: el más empleado consiste en un imán en herradura cuyos polos están a corta distancia. El campo magnético está cerrado por la membrana y la bobina rodea uno de los polos. Para eliminar completamente la posibilidad de una desimantación, se fabrican receptores cuyo núcleo de hierro dulce, el que lleva el carrete, se imanta por el paso de una corriente continua por la propia bobina.

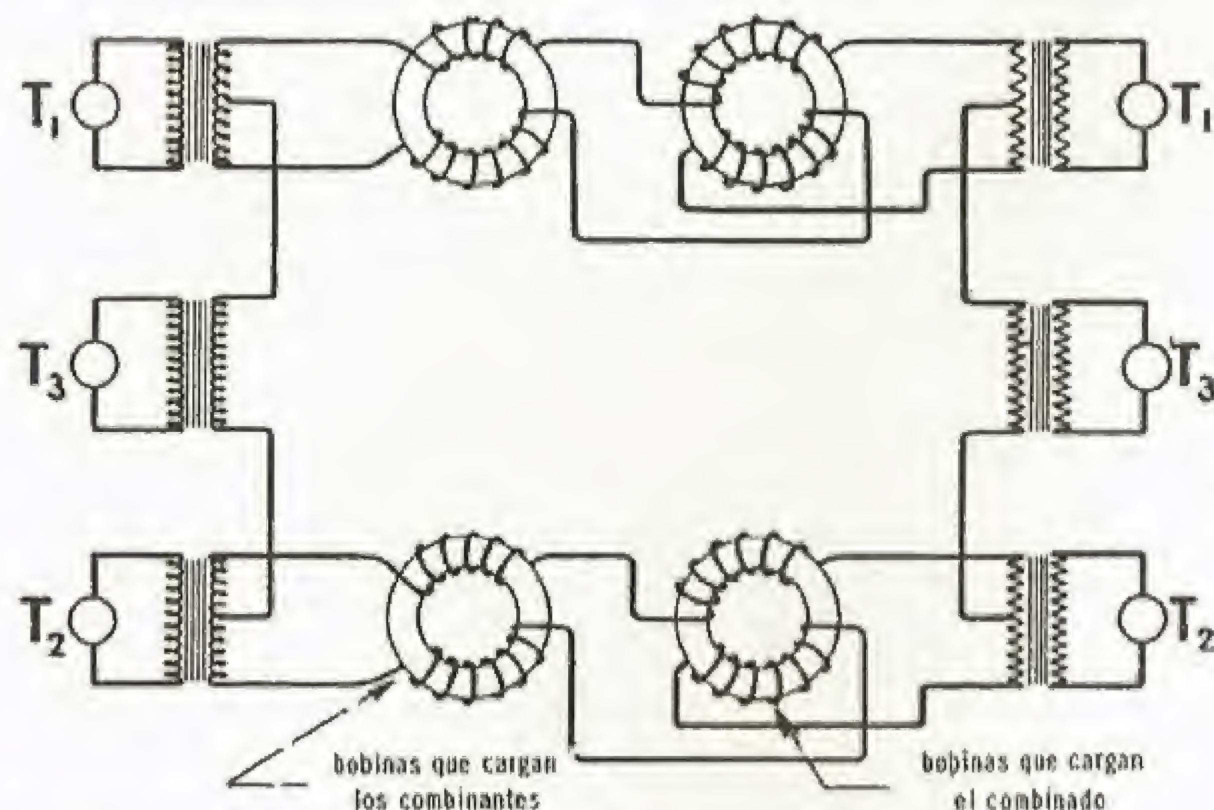


Fig. 627. — Pupinización de las líneas telefónicas que utilizan cuatro bobinas en cada línea de carga: T_1, T_2, circuitos combinantes; T_3, circuito combinado

Por lo general, se asocian el transmisor y el receptor en un mismo aparato, llamado *combinado*, que consiste en un soporte aislador que puede sujetarse con la mano y permite tener el receptor en el oído y el micrófono cerca de la boca.

Corrientes telefónicas. — La energía que transportan las corrientes provocadas en el micrófono por el sonido de la voz es muy débil; apenas mayor de algunas milésimas de vatio. Se comprende, pues, la necesidad de estudiar con detenimiento las líneas telefónicas para que no se debilite demasiado esta escasa energía y sea posible la conversación a grandes distancias. Este problema ha preocupado durante mucho tiempo a los técnicos de teléfonos, y no se ha resuelto verdaderamente hasta hace muy pocos años, es decir, hasta el empleo en telefonía de la corriente portadora.

Líneas telefónicas. — Las líneas urbanas, o sea las destinadas a poner en comunicación a los abonados de una misma ciudad, fueron primitivamente aéreas; ya no existen, bajo esta forma, más que en las pequeñas ciudades, utilizándose en general cables subterráneos. Un cable lo forman pares de hilos de cobre cuidadosamente aislados y reunidos dentro de un tubo de plomo. Según las distancias, se escogerán hilos de mayor o menor resistencia, es decir, de mayor o menor diámetro. Esos diámetros oscilan entre 0,4 mm y 1 mm.

La debilitación de la corriente telefónica depende de la resistencia y de la capacidad de la línea. Por esta razón, todos los enlaces interurbanos se han hecho durante mucho tiempo con líneas aéreas, cuya capacidad es mucho menor que la de los cables subterráneos. Una corriente telefónica que recorra un cable de 100 km llega a su extremidad con una potencia igual a una millonésima parte de su potencia de salida. Para disminuir la resistencia de las líneas aéreas se ha aumentado el diámetro de los hilos, aunque, por razones prácticas, este diámetro no ha podido nunca exceder de 6 mm. En estas condiciones, el alcance máximo es de 500 kilómetros, pero puede aumentarse disponiendo sucesivamente amplificadores (v. RADIOTRANSMISIONES, pág. 221). A pesar de ello, las líneas aéreas ofrecen numerosos inconvenientes: son caras y no permiten, al contrario de los cables, que se establezcan circuitos muy numerosos. Las líneas aéreas tendidas a lo largo de las vías férreas no sobrepasan los 80 circuitos, los cuales no bastan para enlazar dos grandes ciudades; se ha vuelto, pues, a los cables. Para disminuir la capacidad de éstos, o, más bien, para disminuir el efecto de esta capacidad, el físico Pupin propuso la colocación, a cada cierta distancia, de autoinducciones (*figura* 629); desde 1924, pues, existen los cables pupinizados, con amplificadores a cada 60 ó 100 km. Ante el aumento del tráfico telefónico interurbano, estos cables se revelaron pronto insuficientes: son necesarios cuatro hilos por circuito. Por ello se utiliza actualmente la telefonía por corriente portadora, que permite utilizar un sólo circuito de cuatro hilos para transmitir múltiples conversaciones: han llegado a transmitirse hasta 800.

Telefonía por corriente portadora. — Utiliza una corriente auxiliar alterna de muy alta frecuencia. Sea F esta frecuencia; esta corriente auxiliar, llamada *corriente portadora*, es modulada (v. RADIOTRANSMISIONES, pág. 219) por la que sale del micrófono telefónico. Sea f una de las frecuencias transportadas por esta corriente microfónica; la superposición de ambas corrientes equivale a la superposición de tres corrientes de frecuencias: $F - f$, F y $F + f$, conservándose nada más que una de estas frecuencias por medio de filtros, por ejemplo la $F - f$. A la llegada, se superpondrá a esta corriente otra nueva corriente de frecuencia F, con lo que se tendrán las tres frecuencias: $F - (F - f)$, F y $F + (F - f)$. Pero sólo se conserva la primera, que es f, es decir, la procedente del micrófono. Si se utilizan dos corrientes portadoras de diferentes frecuencias F_1 y F_2, podrán transmitirse dos conversaciones simultáneas por un mismo circuito, para lo que bastará separar en las llegadas, con filtros, las frecuencias $F_1 - f$ y $F_2 - f$, siempre que las radiaciones de la frecuencia f no provoquen recubrimientos de las bandas $F_1 - f$ y $F_2 - f$.

Las frecuencias vocales f se escalonan desde 100 a 10 000 ciclos/segundo, pero la transmisión de la palabra se efectúa muy bien con un intervalo mucho más pequeño: de 300 a 3 400 ciclos. Deberán, pues, escogerse frecuencias F para las corrientes portadoras escalonadas de 4 000 ciclos por segundo. Tomando corrientes portadoras comprendidas entre 12 000 y 60 000 ciclos, podrán transmitirse, por un mismo circuito, doce comunicaciones telefónicas a la vez; este sistema de doce "vías" se utiliza corrientemente en algunas naciones europeas, por ejemplo en Francia, pero todavía se puede ir mucho más lejos: en Norteamérica se estudia actualmente la transmisión por un sistema de 800 vías, escalonándose las frecuencias entre 12 000 ciclos y 4 400 millones de ciclos.

Los cables que se utilizan para corrientes portadoras no deben estar pupinizados; entonces no dejarían pasar las corrientes de alta frecuencia utilizadas. Cada 20 a 35 kilómetros se colocan amplificadores que funcionan automáticamente. El dispositivo de llegada es, naturalmente, bastante complejo, puesto que deberá tener filtros de clasificación de las diferentes vías y aparatos para la producción de frecuencias F. Debe señalarse a este respecto que, para que el sistema funcione convenientemente, es necesario que las frecuencias F que se producen a la salida y a la llegada sean lo más idénticas posible, lo que se consigue con cuarzos piezoeléctricos, tallados con una precisión que puede alcanzar la diezmilésima de milímetro.

Para los sistemas con numerosas vías ha habido necesidad de recurrir, a causa de las altas frecuencias utilizadas, a cables especiales llamados *cables coaxiales*, en los que uno de los hilos es un cilindro conductor hueco que rodea el otro hilo; el aislamiento se realiza por discos de materia plástica. El diámetro del cilindro debe ser 3,6 veces mayor que el del hilo central.

Líneas intercontinentales. — Están *constituidas por cables submarinos*, formados por un ramal de hilos de cobre rodeados de varias capas de gutapercha. Este conjunto va protegido con hilos de yute cubiertos de una armadura de hilos de acero o de hierro galvanizado. Son difíciles de colocar. Además, no es posible instalar amplificadores en el fondo del mar. La mayoría de las veces están krarupizados, y algunas veces pupinizados, aunque la instalación de los carretes Pupin en el fondo del mar es siempre una operación delicada; actualmente se construyen trozos de cable de hasta 150 km de longitud.

El servicio telefónico, primeramente asegurado por la radiotelefonía, funciona también desde hace poco por cable doble —uno en cada sentido— incorporándosele por cada 65 km una minúscula estación de amplificación. El primer cable de este tipo se inauguró el 25 de septiembre de 1956, entre Oban (Escocia) y Clarenville (Terranova). Tiene 3 600 kilómetros de longitud y permite que se efectúen treinta y seis comunicaciones simultáneas.

Organización del teléfono
Conmutación

Los primeros enlaces telefónicos se hacían de estación a estación.
La primera central telefónica que permitió ligar entre sí varios aparatos se construyó en los Estados Unidos en 1878, y constaba de ocho abonados. En la actualidad existen en todo el mundo 66 millones de teléfonos.
La conmutación es el conjunto de operaciones, manuales o automáticas, necesarias para poner en comunicación a dos abonados al teléfono, pertenezcan o no a la misma red telefónica.
En una central telefónica corresponde a cada abonado, o a cada localidad, una línea (o varias) de dos hilos, provista de un órgano de llamada (relevador), que al ser accionado, abre la línea que llama. Desde el momento en que puede recibirse la demanda del abonado, y hasta que se corta la comunicación, el relevador de llamada está en reposo y fuera del circuito por medio de un relevador de corte asociado con él. Dos líneas se ponen en relación mediante conexiones, cuyo número varía según la importancia del tráfico.
En la última conexión auxiliar, que corresponde al abonado solicitado, hay mecanismos que indican si dicho abonado está libre u ocupado.
En los sistemas telefónicos manuales, la elección de las conexiones libres que permiten relacionar al solicitante con el solicitado la efectúan operadores que reciben y transmiten la demanda oral; en los sistemas automáticos, órganos apropiados (selectores, conectores) accionados por señales que hace el abonado solicitante seleccionan la línea del abonado solicitado; en los sistemas semiautomáticos, ciertas maniobras son efectuadas por las operadoras, y otras por dispositivos automáticos.

Conmutación manual. — La instalación del abonado consta de un micrófono, uno o dos auriculares, un conmutador interruptor, un aparato de llamada, un timbre y una pila local o central. El conmutador sirve para pasar los órganos del aparato de la posición conversación a la posición reposo.
Las instalaciones telefónicas pueden ser de batería local o de batería central.
En las de *batería local*, muy empleadas en el campo, el aparato consta de un órgano de llamada (magneto) y de una pila Leclanché, de líquido inmovilizado, que sirve para alimentación del micrófono. El conmutador cierra y abre el circuito de esta pila, que sólo se utiliza durante la conversación.
Cuando la línea está en reposo no se halla sometida a ninguna tensión; el mecanismo de llamada, situado en la central telefónica, es un anunciador.
En las de *batería central*, el abonado no tiene ya que actuar sobre ningún mecanismo de llamada, bastándole con descolgar su receptor para provocar el funcionamiento de un anunciador de llamada. La línea está constantemente bajo tensión (24, 48 ó 60 voltios). En la posición de reposo, el micrófono sólo está conectado con la línea el timbre; en posición de conversación, está conectado directamente con la línea. La instalación de una batería central exige un riguroso aislamiento de las líneas de los abonados correspondientes.

Centrales. Cuadros. — Las centrales sirven para conectar entre sí los teléfonos de un mismo edificio, de una misma ciudad o de ciudades diferentes. En la central, todas las líneas procedentes del exterior afluyen a un distribuidor del que parten todos los conductores que pertenecen a la parte telefónica de la central: cuadros, múltiples o mecanismos automáticos.
Las líneas están agrupadas en forma de órganos fijos llamados *jacks* (*fig.* 628), que permiten una fácil conexión entre los hilos de la línea y un aparato de toma de "jack", llamado *ficha* (*fig.* 629). Las fichas se continúan por órganos flexibles llamados *cordones*, que son movidos por los operadores y en cuyo interior hay un número conveniente de conductores que garantizan la continuidad metálica de los diferentes hilos necesarios al establecimiento de la comunicación.

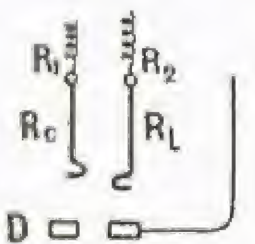


Fig. 628. — *Jack* de tres conductores (Rc, Muelle corto o de punta; Rl, muelle largo o de nuca; D, casquillo)

Cuadro con batería local. — En batería local, la línea de un abonado va a parar, en el cuadro, a un "jack" de doble ruptura. Desde el momento en que empieza a funcionar el anunciador de llamada, la telefonista introduce una ficha en el "jack" y el timbre de llamada cesa; después apoya sobre su clavija de escucha, que le pone en comunicación con el abonado, el cual pide el número. La telefonista introduce entonces una ficha conectada con la del solicitante en el "jack" del solicitado, y produce así una corriente de llamada para el solicitado. Cuando éste ha respondido, la telefonista vuelve a poner su clavija de escucha en reposo. Un anunciador especial permite a uno de los abonados volver a llamar a la telefonista. También se acciona este anunciador cuando, terminada ya la conversación, envían los abonados la señal de fin.


Fig. 629. — Ficha de tres conductores

El conjunto de las dos fichas, cordón, llaves y anunciadores de fin constituyen un *dicordio*. En los cuadros poco importantes, el número de fichas es el mismo que el de abonados: cada línea tiene un anunciador, un "jack" y una ficha (*monocordio*). Cuando un abonado desea comunicar con otro, basta con introducir la ficha del primero en el "jack" del segundo.

Cuadro con batería central. — Cuando los abonados están comunicando, la operadora lo sabe por una señal visible. La fuente de corriente de la que se surten todos los abonados suele ser una batería de acumuladores.


Cuadro con batería

Al descolgar el abonado su aparato, se enciende una lámpara, y la operadora introduce la ficha de un dicordio en el "jack", apagándose entonces la lámpara.
La ficha está conectada con la batería por medio de un autoinductor que impide el paso de la corriente telefónica y deja pasar la corriente continua. Las dos fichas del dicordio están conectadas mediante condensadores que sólo dejan pasar la corriente continua. El dicordio tiene las mismas llaves que un cuadro de batería local. Cuando la conversación ha terminado, se encienden lámparas de *supervisión*.
Si el número de abonados no pasa de cien, los cuadros con batería local o con batería central son atendidos por una sola operadora. Si exceden de este número, hacen falta varias operadoras y varias encargadas de los cuadros. Cuando un abonado solicita comunicar con otro perteneciente a otro cuadro, el empleado del primer cuadro coloca, por medio de un par de fichas, el "jack" correspondiente al primer abonado y el de intercomunicación entre los dos cuadros, y el empleado del segundo cuadro conecta el "jack" de intercomunicación entre ambos cuadros con el del segundo abonado.

Múltiple. — Si el número de abonados es mayor de 600, se utiliza el dispositivo llamado *múltiple*. Cada operadora tiene a su alcance los "jacks" de cierto número de abonados, agrupados por centenas, y encima de los cuales hay una lámpara de llamada. Hay, además, "jacks" generales en igual número que el de abonados de la central. Un empleado puede alcanzar los "jacks" generales de los cuadros colocados al lado del suyo; forman cada tres cuadros una sección. En una central de 6 000 abonados, una sección consta de 6 000 "jacks" generales (2 000 por cuadro).
Para establecer una comunicación, se conecta el "jack" individual del que llama con el general del llamado. Una sola operadora responde a un abonado, pero, en cambio, pueden llamarlo todas. Para saber si está libre la línea del abonado, antes de introducir la ficha de respuesta en el "jack" del llamado, se toca el casquillo de este "jack" con la punta de la ficha (prueba). Si el solicitado está ocupado, la operadora oye una señal en su receptor. Cuando hay varios despachos, los operadores de cada uno de ellos están especializados: unos cuantos responden a las llamadas sobre las posiciones de salida en A, y otros, sobre posiciones de llegada en B, avisan a los abonados solicitados.
Las relaciones interurbanas están a cargo de despachos especiales, equipados con múltiples de batería local.

Conmutación automática. — El propio abonado es quien provoca el establecimiento de su comunicación. El autoconmutador se encarga de seleccionar la línea solicitada por el que llama, escogiendo por sí mismo las líneas y órganos libres utilizables para esa comunicación.
En una red automática, el aparato del domicilio del abonado tiene un *cuadrante de llamada* que produce en la línea rupturas en serie de corriente, breves e iguales, llamadas *impulsiones*, que son características del número solicitado a la sala de mecanismos (*relés, preselectores* o *buscadores*) y que permiten ligar la línea del solicitante con un órgano de conexión libre que permanece inmovilizado durante toda la conversación: órganos de conexión (*conectores* o *selectores*) encargados de la selección de solicitante bajo la acción de las impulsiones.

Cuadrante de llamada. — Es el mismo en todos los sistemas, y consiste en un disco, con los números inscritos, ante el cual puede girar otro disco provisto de orificios circulares que están situados encima de cada uno de los números. Se introduce el dedo en el círculo correspondiente a la cifra que se quiere marcar, girando el disco móvil hasta que tropieza con un tope, y se suelta después. Al volver el disco a la posición de reposo, provoca sobre la línea un tren de impulsiones cuyo número corresponde a la cifra formada. Para hacer una llamada, el abonado envía un tren de impulsiones por cada una de las letras o de las cifras que tiene el número al que llama, pero para ello es necesario que su línea se prolongue en la central a través de un dispositivo que permita registrar las impulsiones, de lo cual es advertido el abonado que efectúa la llamada por una señal acústica continua muy característica: el *tono*.
Un circuito de recepción de impulsiones consta de: un *relevador de línea*, que actúa sobre el circuito de impulsión, el cual comprende un aparato que se coloca en una posición característica del número de impulsiones recibidas; un *relevador de ocupación*, que impide que el aparato recoja otra llamada; un *relevador de conmutación*, accionado desde la primera hasta la última impulsión por un tren de impulsiones; que cae antes de que se envíe el tren siguiente, asegurando así la conmutación necesaria para recibir este segundo tren sobre otro órgano. El que llama es advertido de que el número deseado no está libre por una señal característica enviada sobre su línea; igualmente es advertido por otra señal de que el llamado está recibiendo su llamada.

Diversos sistemas de telefonía. — Se clasifican en dos grupos, según la forma en que los trenes de impulsiones actúan sobre la selec-

ción: 1° los sistemas de acción *directa* de la selección, o de impulsiones directas (*Strowger* y sus derivados); 2° los sistemas de acción *indirecta* de la selección o de impulsiones inversas, o de arrastre mecánico (Rotary, Parrel, Ericsson).

Automáticos rurales. — En las pequeñas localidades, que tienen un número reducido de abonados, las pequeñas centrales manuales han sido sustituidas por aparatos automáticos. Cuando un abonado de una de esas localidades llama a otro de un centro vecino, le responde la telefonista de esta localidad, que devuelve la llamada a la primera localidad por medio de órganos automáticos. Cuando es el abonado de la pequeña localidad el que recibe la llamada, la telefonista del centro manual de enlace le llama por medio de un cuadrante que accionan a distancia los órganos automáticos de la localidad. De esta forma, se conectan con un solo centro manual un número bastante grande de abonados.

Radiotransmisiones

Reseña histórica. Ondas electromagnéticas. Principios de la radiotransmisión. — **Emisión:** Periodo propio de un circuito. Emisión en ondas amortiguadas. Emisión en ondas sostenidas. Lámpara de tres electrodos. Triodo. Empleo de la lámpara triodo como osciladora. Otros tubos electrónicos. Lámparas faros. Klystron. Magnetrón. Transmisión de señales. Modulación. — **Recepción:** Sintonía. Detección. Empleo de la lámpara triodo como detectora. Amplificación. Recepción de las señales telegráficas. Recepción en superheterodino. Progresos recientes de las radiotransmisiones. — **Ondas dirigidas:** Dirección de las ondas largas. Cuadros. Dirección de las ondas cortas. Caso de las ondas ultracortas. — **Propagación de las ondas electromagnéticas:** La capa de Kennely-Heaviside

Reseña histórica. — La posibilidad de transmitir señales inalámbricas fue realizable gracias a la *inducción*, descubierta por Faraday en 1831. La teoría electromagnética de Maxwell preveía, hipotéticamente, la existencia de ondas electromagnéticas, que fueron descubiertas, en 1888, por **Hertz** (1857-1894). Lord Kelvin había demostrado, en 1853, que la descarga de un condensador era oscilante. Para obtener una descarga de este tipo cuyas oscilaciones fueran sumamente rápidas, Hertz utilizó un condensador de muy poca capacidad, cuyas armaduras eran dos esferas situadas a cierta distancia. Estas armaduras estaban unidas, además, por un conductor que podía interrumpirse sobre una longitud regulable, y cuyos dos bornes estaban conectados con el secundario de una bobina de inducción, que permitía cargar el aparato a una tensión elevada.

La bobina se descarga luego en el condensador formado por las dos esferas, a intervalos del orden de una milésima de segundo.

En la separación estalla una chispa, y el condensador se descarga. Esta descarga oscilante, es, en realidad, una corriente eléctrica que cambia de sentido muchas veces por segundo; de ello resulta que el campo magnético y el campo eléctrico creados por esta corriente cambian de sentido el mismo número de veces que la corriente y simultáneamente con ella: el excitador de Hertz es, pues, un generador de ondas electromagnéticas.

Para poder detectar las variaciones del campo eléctrico y del campo magnético en el espacio que rodea al excitador, Hertz utilizaba un circuito de resonancia formado por una espiral de cobre provista de una separación o corte cuya anchura podía regularse por medio de un tornillo. Comprobó que cuando el resonador se colocaba en dicho espacio se producían chispas en su corte; por consiguiente, se había inducido una corriente en el circuito resonador, y se había propagado por el espacio energía electromagnética. Esta experiencia puede ser considerada como el primer paso de la telegrafía sin hilos. Después se procuró aumentar su alcance: **Calzecchi Onesti** observó, en 1885, que las limaduras metálicas colocadas entre dos electrodos ofrecen una resistencia eléctrica considerable; sin embargo, si son atravesados por la descarga de una bobina de inducción, su resistencia disminuye enormemente. **Branly** (1844-1940), que encontró nuevamente esta propiedad en 1890, descubrió que la variación de la conductibilidad de los tubos con limaduras se verifica también aunque la descarga de la bobina se produzca en el exterior: llamó a estos tubos *radioconductores*.



Antena emisora de la torre Eiffel (París) [*Fot. Radiodiffusion française*]

Lodge propuso más tarde, en 1894, utilizar estos tubos, que denominó *cohesores*, para la detección de las ondas electromagnéticas. **Popoff** (1895) y después **Marconi** (1874-1937) perfeccionaron el cohesor y lo hicieron lo suficientemente potente para poder accionar un aparato Morse. Marconi tuvo la idea de colocar sobre los excitadores que producen las oscilaciones un largo hilo vertical, la *antena*, que comunicaba con uno de los polos de la chispa activa, estando el otro polo en tierra. Un segundo hilo análogo recibía la onda a la llegada y la transportaba desde el receptor al cohesor. En 1898 consiguió transmitir señales por T. S. H. entre Wimereux y un punto de la costa inglesa situado a 30 km de distancia. Marconi aplicó los principios de la sintonía, previamente establecidos por Lodge, Blondel y Braun, y consiguió, en 1901, realizar una transmisión a 300 km de distancia; como consecuencia de estas experiencias se hicieron ensayos en diferentes países. En Francia, **Ducretet** y **Ferrié** (1868-1932) se ocuparon en la telegrafía militar; **Tissot** adaptó la T. S. H. a la marina; **Voisserat,** a los servicios de correos y comunicaciones, y **Blondel,** a los faros.

La invención de los tubos o válvulas electrónicas, de los cuales constituyen los primeros ejemplos las lámparas diodos y triodos de **Lee de Forest,** ha permitido que las transmisiones por ondas hertzianas o radiotransmisiones alcancen el considerable desarrollo que hoy tienen.

Ondas electromagnéticas. — Un circuito eléctrico recorrido por una corriente crea en el espacio un campo eléctrico y un campo magnético (v. ELECTRICIDAD, pág. 108 y 130). Si la corriente eléctrica es una corriente alterna, los campos eléctrico y magnético creados en un punto del espacio seguirán exactamente las variaciones de la corriente, y se producirá una fuerza electromotriz de inducción en un segundo circuiuto colocado en ese punto; se ha producido, pues, en este caso, una transmisión de energía entre el primero y segundo circuitos, transmisión efectuada a través de los campos eléctrico y magnético variables creados por el primer circuito. Puede decirse que este último circuito irradia energía; la propagación de esta radiación, no es, pues, instantánea, sino a la velocidad de la luz. Un circuito oscilante emite en el espacio ondas electromagnéticas que transportan energía: las ondas hertzianas.

Estas ondas pueden compararse en todos los aspectos con las ondas luminosas; con ellas pueden reproducirse los fenómenos de reflexión, refracción, difracción e interferencias, y sólo se distinguen por sus longitudes de onda, que varían entre unos cuantos centímetros y algunos kilómetros, mientras que las longitudes de las ondas luminosas visibles están comprendidas entre 4 y 6 diezmilésimas de milímetro. Sus frecuencias son, por lo tanto, mucho más pequeñas. Mientras que el campo magnético o eléctrico creado en un punto del espacio por una antena de radiodifusión que emite en una longitud de onda de 300 m varía periódicamente a razón de un millón de veces por segundo, el que produce una fuente de luz roja oscila un trillón de veces al mismo tiempo.

Las ondas utilizadas en la práctica para las radiotransmisiones se dividen en: *ondas largas*, las superiores a 1 000 m; *ondas medias*, las de 100 a 500 m; *ondas cortas*, las de 1,5 m a 100 m y *ondas ultracortas*, las de menos de 1,5 m.

También se utiliza, en lugar de la longitud de onda, la frecuencia, que se expresa en ciclos o períodos por segundo; como se trata de números elevados, se emplean sus múltiplos: el kilociclo, que vale 1 000 ciclos, y el megaciclo, que vale 1 millón de ciclos. El ciclo por segundo se denomina *hertz*. Para obtener la frecuencia se divide la velocidad de la luz por segundo por la longitud de onda expresada en las mismas unidades. Una longitud de onda de un metro corresponde a una frecuencia de 300 megaciclos.

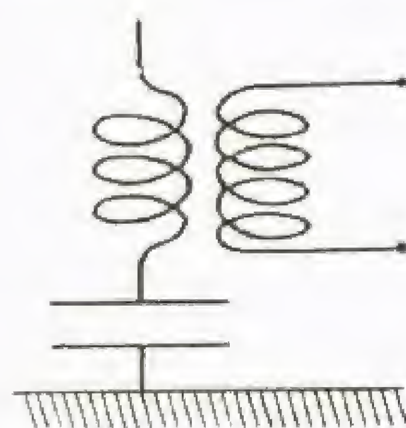


Fig. 630

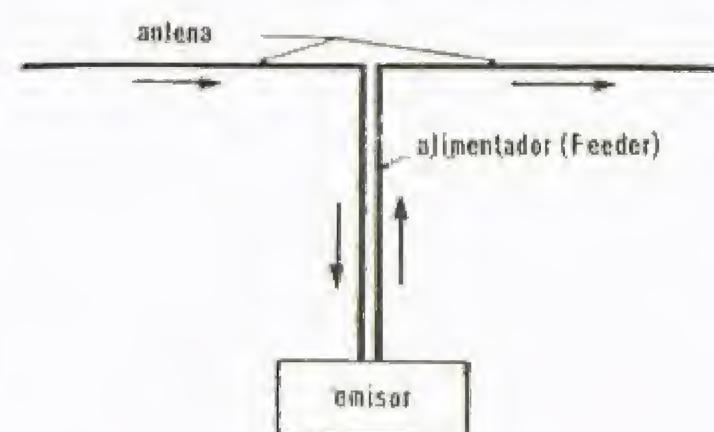


Fig. 631

Principios de la radiotransmisión. — La estación emisora es un circuito oscilante que irradia energía electromagnética, y la estación receptora un circuito en el cual aparece, bajo forma de corriente inducida de la misma frecuencia que la del circuito emisor, una parte de la energía que éste irradia. La potencia de las corrientes que se producen en la estación receptora es del orden del microvatio.

Un circuito oscilante cerrado irradia muy poca energía; en efecto, a cada elemento de hilo recorrido por la corriente en un sentido, corresponde, en su proximidad, otro elemento de hilo recorrido en sentido inverso, de forma que los campos que crean en cada punto del espacio son aproximadamente iguales y de sentidos contrarios, por lo que se anulan. Para irradiar mucha energía, el circuito tiene que ser abierto. Los primeros circuitos emisores estaban constituidos por un hilo vertical, la antena, cuya extremidad inferior estaba unida a la Tierra por medio de una autoinducción o de un condensador (*fig.* 630); las oscilaciones de este circuito se obtenían por inducción, por medio de un segundo circuito oscilante. Actualmente se prefiere utilizar antenas horizontales unidas al circuito emisor por dos hilos paralelos *(feeder)* [v. *fig.* 631]. Las flechas de la figura indican el sentido de la corriente, mostrando cómo únicamente la antena irradia energía. El rendimiento de una antena es la relación entre la energía que ella irradia y la energía total que se produce en el circuito oscilante, siendo mejor este rendimiento en las ondas cortas que para las largas: en las primeras puede superar el 60%.

El circuito receptor lleva también una antena que capta, por inducción, la energía irradiada. La energía recogida es tanto mayor cuanto más espacio ocupe la antena. Para transmitir una señal Morse se procede como en la telegrafía por hilos, es decir, se suprime la corriente y se restablece después. La corriente del receptor reproducirá estas interrupciones, largas o breves, de la corriente emisora. Para detectarla, como la corriente recibida es una corriente alterna de gran frecuencia, cuya acción sobre un receptor de telégrafo o sobre un auricular telefónico es nula, hay que suprimir una de sus alternancias (*fig.* 632), es decir, hay que rectificarla. Una vez rectificada, la corriente podrá actuar sobre un receptor de telegrafía. Por lo tanto, un receptor de radiotransmisión comprende siempre un rectificador de corriente, llamado "detector".

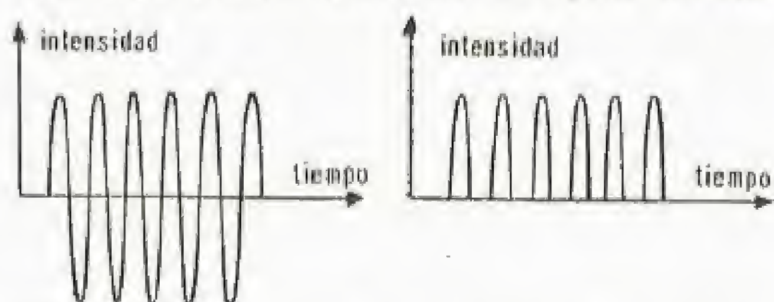


Fig. 632. — *A la izquierda*: corriente alterna de alta frecuencia. *A la derecha*: la misma corriente rectificada

Para transmitir palabras o música, hay que modular la amplitud de la onda por medio de la corriente que produce un micrófono (*fig.* 633). Esta corriente modulada y rectificada, actuará, en el receptor, sobre la placa de un auricular telefónico o de un altavoz.

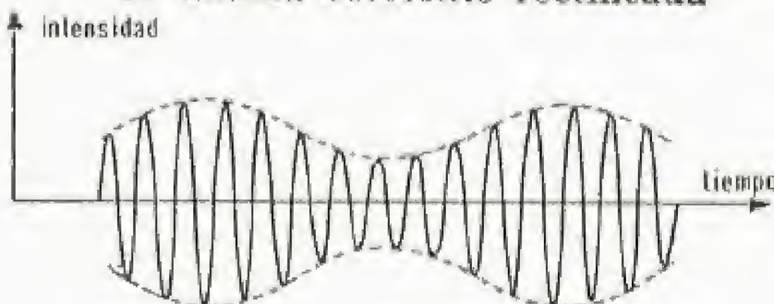


Fig. 633. — Corriente modulada

Emisión

Período propio de un circuito. — Cuando se descarga un condensador de capacidad C en un circuito con una resistencia R y una autoinducción L, la corriente de descarga es, como se sabe, una corriente alterna (*fig.* 634), si la resistencia es pequeña, es decir, más exactamente, si $4\frac{L}{C} > R^2$. El período de la corriente alterna amortiguada está expresado por la fórmula $T = 2\pi\sqrt{LC}$. Puede, pues, obtenerse un circuito oscilante, pero sólo de oscilaciones amortiguadas, descargando simplemente un condensador en ese circuito. Éste irradiará ondas electromagnéticas amortiguadas. Si se repiten varias veces por segundo las operaciones de carga y descarga del condensador, se propagará por el espacio una sucesión muy rápida de ondas amortiguadas; el fenómeno equivaldría poco más o menos, a lo que sucedería si el circuito emitiera una onda electromagnética de período T. Ésta es, en realidad, la experiencia de Hertz.

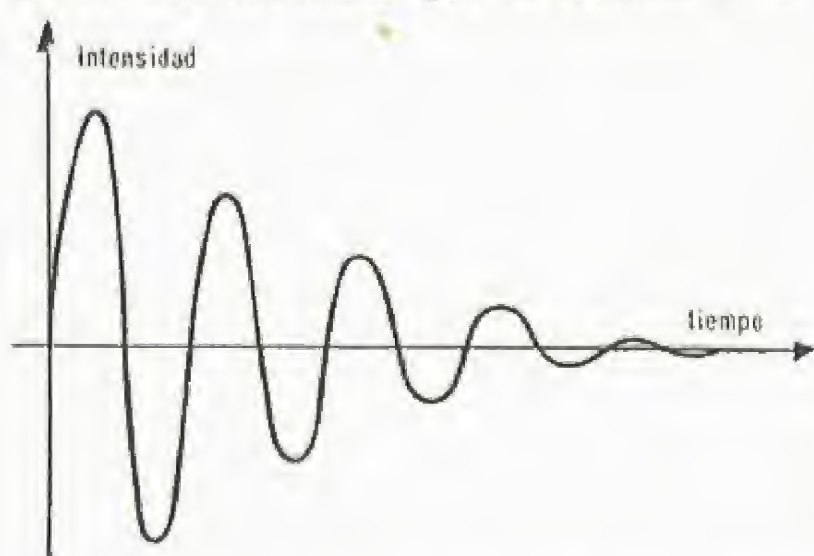


Fig. 634. — Corriente alterna amortiguada

Debe señalarse que el período de estas ondas es lo que se llama período propio del circuito (v. CORRIENTES ALTERNAS, pág. 141), es decir, el período propio de la corriente alterna menos amortiguada por este circuito. Esta observación tiene gran importancia para la recepción de las ondas electromagnéticas.

Emisión de ondas amortiguadas. — Las primeras radiotransmisiones se efectuaban con ondas amortiguadas: la estación emisora era del tipo de uno cualquiera de los esquemas de las figuras 630 y 635. El circuito oscilante formaba parte del circuito de antena o actuaba por inducción sobre el mismo. La sucesión de las chispas de descarga era sumamente rápida: de algunas centenas a algunos millares por segundo. Por lo tanto, los trenes de ondas amortiguadas se sucedían a esa cadencia; captadas por una estación receptora, y rectificadas después, podían hacer que entrara en vibración la membrana de un auricular telefónico a su propia cadencia, obteniéndose, según el valor de ésta, un sonido musical o un ruido. Las señales Morse así emitidas se recibían entonces "de oído". Conviene señalar que la vibración del auricular es completamente independiente de la frecuencia de las ondas, que es mucho más elevada que la cadencia a que se producen los trenes de ondas.



Fig. 635

La emisión por ondas amortiguadas no se utiliza ya prácticamente y ha sido reemplazada por la emisión de ondas *sostenidas* o *entretenidas*, es decir, ondas continuas de amplitud constante, que ofrecen posibilidades muy superiores tanto para la emisión como para la recepción.

Emisión en ondas sostenidas. — El arco oscilante ha permitido durante muchos años obtener prácticamente ondas sostenidas; después, los técnicos trataron de obtener la corriente de alta frecuencia mediante los alternadores que producen las corrientes alternas industriales, pero, para alcanzar la frecuencia indispensable, fueron necesarias velocidades considerables y gran número de polos. En estos alternadores, los devanados del inducido y del inductor permanecen inmovilizados y la variación del flujo es producida por la rotación de un núcleo de hierro rotatorio, cuya velocidad puede ser, sin que surjan inconvenientes, muy elevada.

La invención de las lámparas termoiónicas produjo una revolución en la T. S. H., ya que gracias a ella han sido posibles la modulación, la recepción, la amplificación y la producción de ondas sostenidas o entretenidas de cualquier longitud.

En 1907, Lee de Forest inventó los *audiones*, cuyo empleo se desarrolló en 1914. Consisten en una lámpara de incandescencia a la cual va soldada una pequeña placa de metal. Se une la placa con el polo positivo de una batería de pilas o de acumuladores (60 a 80 voltios) y, una vez calentado el filamento, hasta ponerse incandescente, por medio de otra batería, se unen los polos negativos de ambas baterías, intercalando en el circuito un miliamperímetro sensible. El miliamperímetro acusa el paso de una corriente dentro de la lámpara, en el sentido placafilamento, la cual es debida a la serie de electrones que van desde el filamento incandescente hacia la placa (*figura* 636).

Este transporte de electrones no puede ocurrir más que si la placa tiene un potencial positivo con respecto al filamento; la lámpara así constituida funciona como una válvula, y no deja pasar la corriente más que en un solo sentido. Si se la utiliza como detector, conectándola con un circuito recorrido por corrientes alternas, la corriente sólo circulará cuando la placa sea positiva con respecto al filamento. Esta lámpara se denomina *diodo* cuando es utilizada como detectora de corrientes de frecuencia elevada, y válvula cuando sirve para rectificar corriente industrial (v. p. 148). En 1904, J. A. Fleming utilizó la lámpara díodo para rectificar las corrientes alternas.

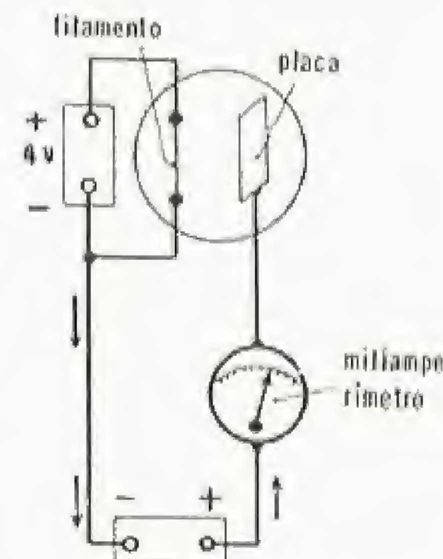


Fig. 636. — La corriente de la batería pasa de la placa al filamento y desvía el miliamperímetro

Cuando se eleva la tensión positiva aplicada a la placa, la corriente crece primero regularmente, después muy lentamente, y, por último, cesa su aumento y permanece constante: se dice entonces que hay saturación. Esta corriente de saturación depende de la corriente de calentamiento del filamento y crece muy rápidamente.

Lámpara de tres electrodos. Tríodo. — Lee de Forest intentó influir sobre la corriente de placa desde el exterior, para lo cual ideó la adjunción de un electrodo suplementario, denominado *rejilla* (1913). La rejilla consiste (*fig.* 637) en un enrejado o en una espiral que se coloca entre el filamento y la placa, y, por consiguiente, en la trayectoria de los electrones; la rejilla tiene un potencial variable; de esta forma se tienen tres circuitos: el circuito de placa, el circuito de rejilla y el circuito de filamento, los cuales tienen como punto común una de las extremidades de este último. Si la rejilla es negativa, tenderá a que la atracción de la placa sobre los electrones disminuya, y reducirá la corriente de placa; si es positiva, su acción se añade a la del ánodo y la corriente aumenta. Por consiguiente, la rejilla permite regular el flujo de electrones procedentes de la placa.

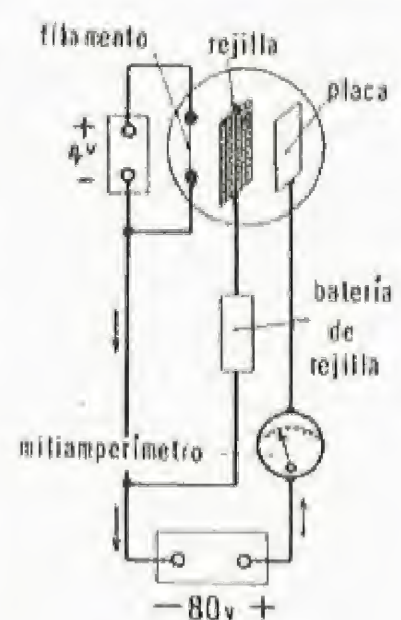
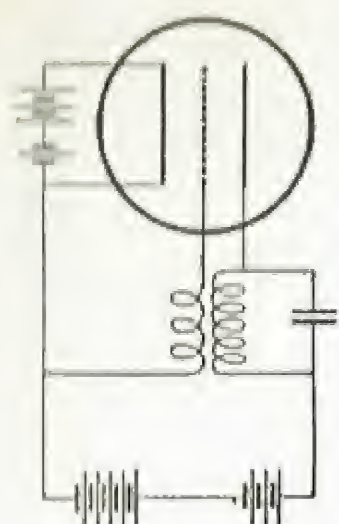


Fig. 637

La lámpara tríodo es utilizada en la emisión como osciladora, y en la recepción como detectora, así como para amplificar la corriente recibida (amplificadora).

Empleo de la lámpara tríodo como osciladora. — Consideremos el esquema de la figura 638: si en el circuito filamento-placa se producen oscilaciones, éstas se transmitirán a la rejilla por medio de la bobina B. Habrá, pues, acoplamiento de los circuitos placa y rejilla. Puede


Fig. 638

concebirse que, regulando convenientemente los circuitos, las oscilaciones así producidas en el potencial de rejilla puedan ir continuamente a intensificar las del circuito filamento-placa. En ese caso las oscilaciones de este último circuito, en lugar de amortiguarse, se seguirán de una manera continua. La energía necesaria para mantener estas oscilaciones es suministrada por los circuitos de alimentación.

Existen otros muchos montajes que permiten obtener oscilaciones sostenidas con una lámpara tríodo. La potencia de estos osciladores puede variar desde unas centésimas de vatios a 500 kW. Las lámparas tríodo utilizadas para los osciladores de gran potencia tienen más de un metro de altura. Las placas, que son cilíndricas, tienen diámetros de 10 a 15 cm, y están refrigeradas por una corriente de agua, pudiendo alcanzar su tensión de alimentación hasta 20 000 voltios.

Otros tubos electrónicos. Lámparas faros. Klystron. Magnetrón. — En la práctica, las lámparas tríodos no permiten producir más que oscilaciones de una frecuencia máxima de 30 megaciclos (onda de 10 m) para las grandes potencias y de 400 megaciclos para las pequeñas (onda de 75 cm). Una de sus razones es la longitud de las conexiones de los circuitos de rejilla y de placa, que tienen autoinducciones y capacidades muy importantes. Las lámparas tríodos llamadas *lámparas-faros* (*fig.* 639), se han obtenido utilizando para las conexiones discos concéntricos en vez de hilos; este tipo de lámparas pueden suministrar oscilaciones de 4 000 megaciclos, es decir, ondas de 7 cm. Ahora bien, a tales frecuencias interviene el tiempo de trayectoria de los electrones entre el filamento y la rejilla, es decir, que los electrones no son ya lo suficientemente rápidos para poder seguir las variaciones de sentido de la corriente.

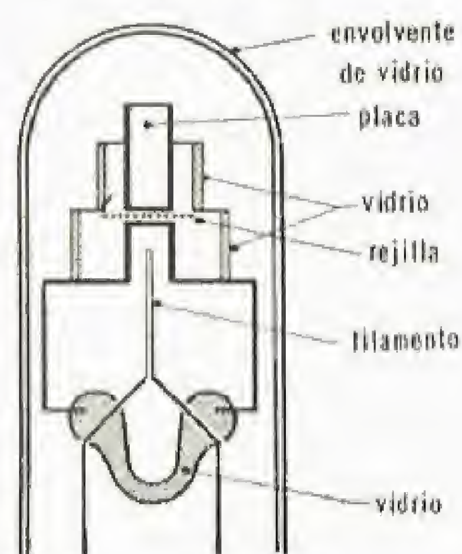


Fig. 639

Se han imaginado entonces tubos electrónicos basados en principios diferentes de los del tríodo, en cuyos detalles no podemos entrar aquí. En el klystron (*figura* 640), se utiliza la modulación de la velocidad de los electrones y las propiedades de resonancia de los cuerpos conductores huecos con respecto a las ondas electromagnéticas. Con este tipo de tubo llegan a producirse ondas de 25 cm, de una potencia de 5 kW. Los magnetrones aplican la acción de un campo magnético auxiliar sobre los electrones del filamento; algunos tienen como los klystrones, cavidades resonantes. Con los magnetrones se obtienen las ondas centimétricas que utiliza el radar.

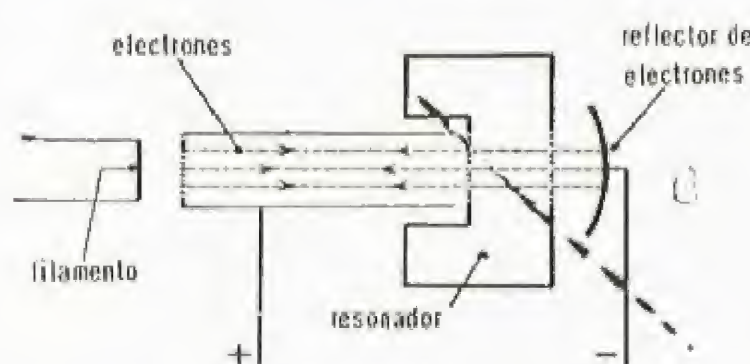
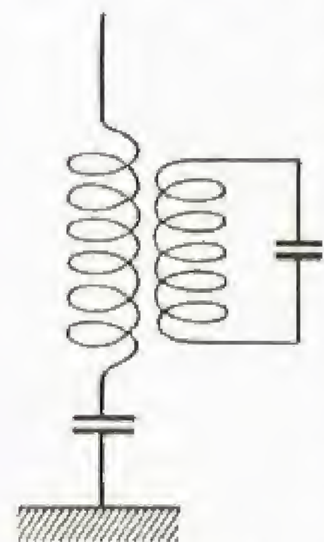


Fig. 640

Transmisión de señales. Modulación. — La transmisión de las señales Morse por ondas sostenidas se efectúa muy sencillamente mediante interrupciones de la corriente oscilante. Para transmitir la palabra y la música, se varía la amplitud de la onda electromagnética, en forma tal que estas modificaciones reproduzcan las variaciones de la corriente del micrófono: se dice entonces que la onda electromagnética está modulada (v. TELEFONÍA, página 217). **Para obtener este resultado se realiza, por ejemplo, el montaje de la figura 638, que es la modulación por rejilla. La corriente** procedente del micrófono actúa sobre la rejilla y modifica la amplitud de la corriente oscilante. Existen otros muchos montajes que permiten la modulación. Esta última puede también hacerse actuando no sobre la amplitud, sino sobre la frecuencia o sobre la fase de la onda portadora. La figura 633 representa la curva de amplitud de una onda modulada.

Recepción

Sintonía. — La intensidad eficaz de la corriente alterna inducida por una onda electromagnética en un circuito será tanto mayor, en igualdad de las restantes condiciones, cuanto más cercano sea el período propio del circuito receptor **al período de las ondas (v. p. 220). El receptor debe estar sintonizado o acordado con el circuito** emisor, lo que se obtiene actuando sobre la autoinducción y la capacidad del circuito. Una vez sintonizado con la longitud de onda de una emisora dada, el receptor estará poco influido por emisoras de longitudes de ondas diferentes, ya que las corrientes inducidas por éstas serán de poca intensidad, y no se producirán interferencias. La sintonía puede mejorarse aún más utilizando dos circuitos acordados; para ello, se ajustará el circuito de antena con la estación emisora, el cual actuará por inducción sobre un segundo circuito, también ajustado (*fig.* 641). Si suponemos que este ajuste permite reducir a un décimo de la corriente producida por la emisora que se escucha la corriente que produce otra emisora, esta división por diez se producirá una vez en la antena y una segunda vez en la inducción de la antena sobre el circuito receptor; así, la intensidad de la corriente perturbadora sólo será entonces la centésima parte de la corriente útil.


Fig. 641

Esta cuestión del ajuste del circuito receptor con el emisor es de capital importancia en radiotransmisión, ya que permite recibir una emisión con exclusión de las restantes; para ello es necesario, evidentemente, que las estaciones emisoras tengan longitudes de onda bien definidas. Las ondas sostenidas permiten obtener una gran estabilidad de frecuencia, muy superior a la obtenida empleando ondas amortiguadas.

Detección. — La corriente recibida tiene que ser rectificada, como hemos visto, a fin de que pueda actuar sobre un receptor telegráfico o sobre un auricular o puesto de escucha telefónico. Estos aparatos, en efecto, están compuestos por electroimanes que atraen una pieza de hierro dulce. Si la corriente cambia de sentido un gran número de veces por segundo, la inercia propia de la pieza le impedirá seguir estas variaciones y permanecerá inmóvil. En cambio, si se ha rectificado la corriente, como su sentido es siempre el mismo, la pieza podrá ser atraída por el electroimán.

El primer detector fue el cohesor de Branly, habiéndose utilizado después rectificadores electrolíticos y cristales de galena (sulfuro de plomo natural). Estos últimos han proporcionado grandes servicios, porque permiten rectificar una corriente gracias a que tienen la propiedad de que el contacto eléctrico entre un cristal de galena y un conductor metálico resiste más el paso de la corriente en un sentido que en otro. Esta propiedad es compartida por otros cristales, entre ellos los de cincita y germanio.

Todos estos detectores han sido completamente abandonados en provecho de la lámpara tríodo. A pesar de ello, los físicos americanos han construido una válvula tríodo de cristal de germanio sin filamento, placa ni rejilla, y que, para ciertos usos, presenta grandes ventajas con relación a la lámpara tríodo clásica. Esta nueva lámpara, de dimensiones muy reducidas, se llama "transistor".

Empleo de la lámpara tríodo como detectora. — La curva que representa las variaciones de la corriente de placa I en función del potencial V_g de la rejilla se representa en la figura 642. La corriente de placa es nula para un cierto valor negativo de V_g; después crece, crecimiento que es lineal entre dos valores V_1 y V_2 de V_g. Para valores superiores, la corriente de placa permanece constante cualquiera que sea V_g y todos los electrones del filamento llegan a la placa. Este valor máximo de la corriente de placa se llama *corriente de saturación*. La curva de la figura 642 se llama *característica de la lámpara tríodo*. Se obtendrán, evidentemente, características diferentes para una misma lámpara tríodo, según el calentamiento del filamento y el potencial de placa, pero la gráfica general sigue siendo la misma.

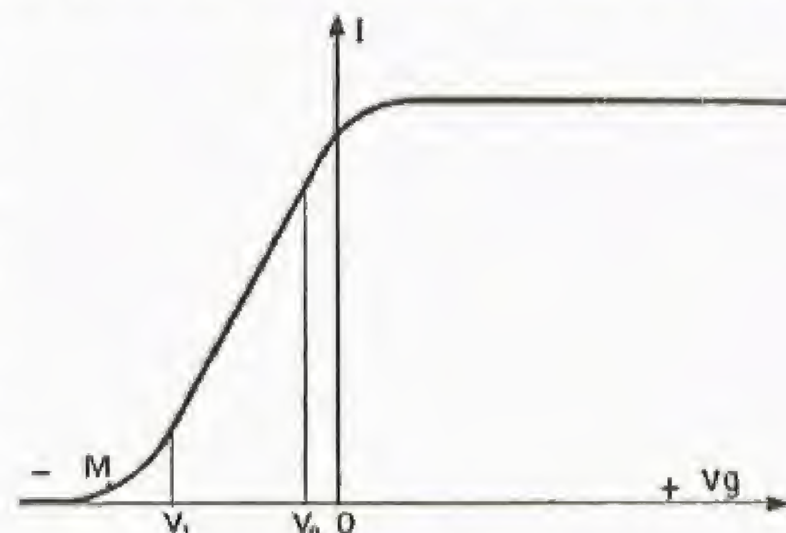


Fig. 642

Supongamos ahora que el potencial medio de rejilla corresponde al punto M de la característica, situado en la parte curva de la misma. Si se aplica a la rejilla la tensión alterna de la corriente de un circuito receptor, el punto M oscilará entre las dos posiciones N y N′ (*fig.* 643), viéndose inmediatamente que la corriente de placa será alterna, si bien la intensidad de una de las alternancias será mucho menor que la de la otra. Estas intensidades son medidas, en efecto, sobre el eje de ordenadas por *on′* y *mn*: la corriente estará, pues, prácticamente rectificada.

Hay otros medios que permiten utilizar la lámpara tríodo como detectora; entre ellos, principalmente, está el cambio de frecuencia.

La gran superioridad de la lámpara tríodo, como detectora, sobre los cristales de galena es que no debilita, prácticamente, la corriente del circuito receptor. La figura 644 representa un montaje muy sencillo de aparato receptor, en el cual la lámpara tríodo está montada en receptora, según el principio antes indicado. La corriente de placa está modulada como la onda de la emisora, pero sólo tiene una alternancia. En el circuito de placa se ha dispuesto un condensador en serie con un transformador. La corriente de placa puede considerarse como la suma de una corriente de muy alta frecuencia —la de la onda portadora— y de otra de frecuencia mucho menor, que corresponde a las modulaciones. La primera corriente recorre mejor la rama del circuito que tiene el condensador que la otra rama, sucediendo lo contrario con la corriente de modulación (v. CORRIENTES ALTERNAS, pág. 141). **En el secundario del transformador sólo se recogerá la corriente modulada de baja frecuencia que,** una vez rectificada, actuará sobre un auricular, se tiene, pues, a la entrada del aparato, una corriente de alta frecuencia, y otra de baja frecuencia a la salida.

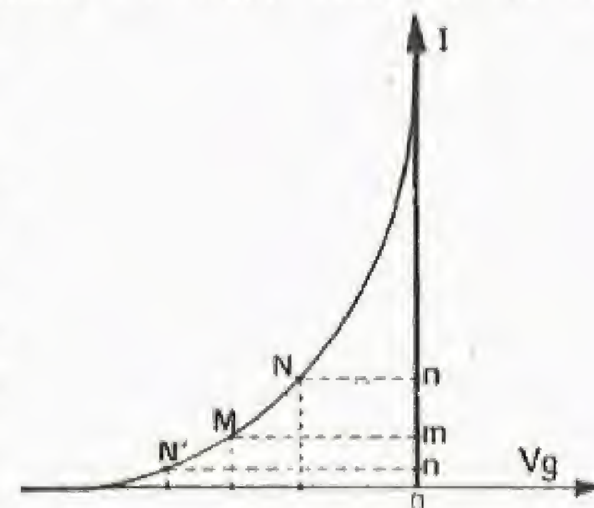


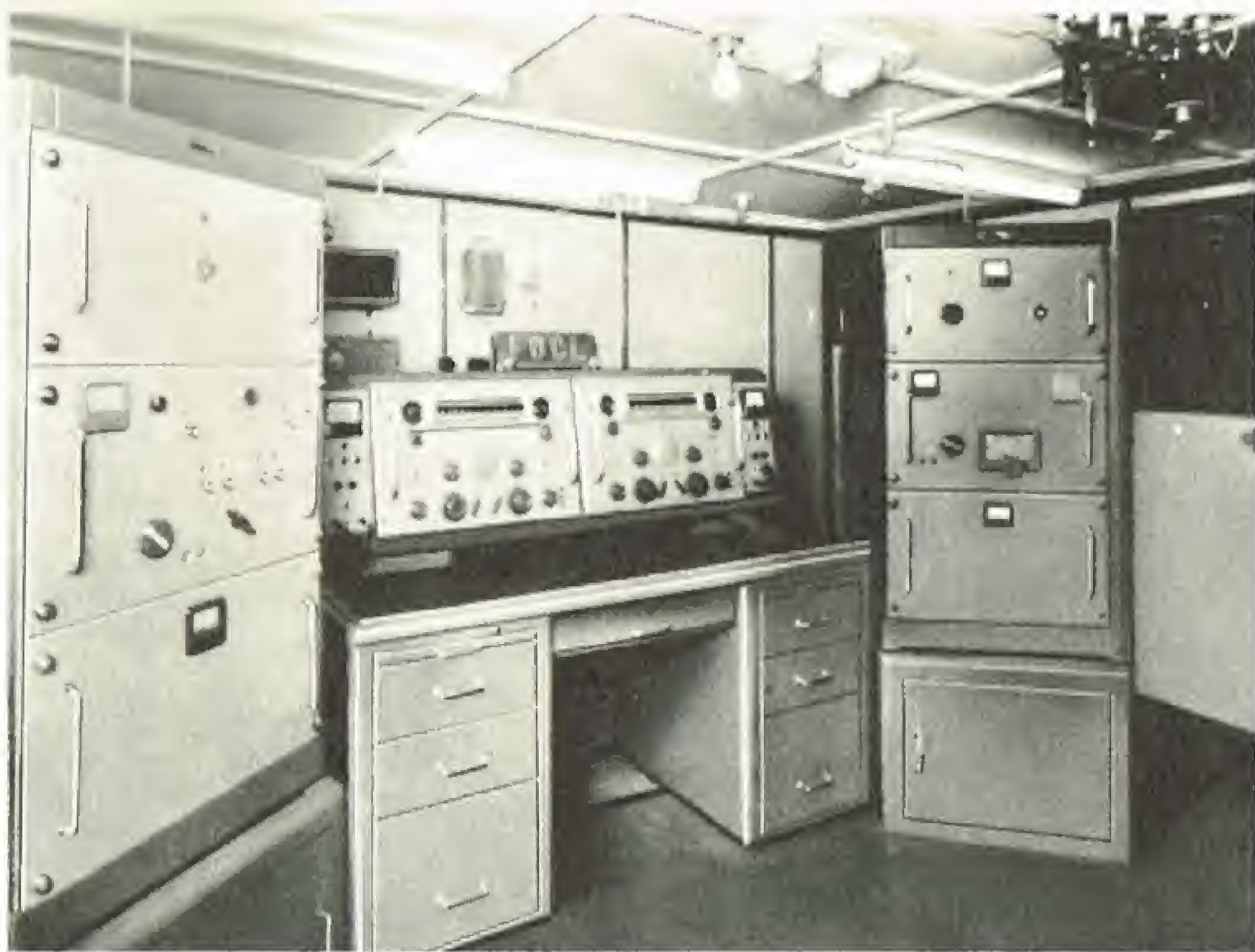
Fig. 643

Amplificación. — La lámpara tríodo, se emplea también, además de servir como osciladora y detectora, como amplificadora de la co-

rriente; esto tiene una gran importancia práctica, porque las corrientes inducidas en la antena receptora son muy pequeñas. Gracias a la amplificación ha podido reducirse considerablemente la dimensión de estas antenas, que en la actualidad sólo están constituidas por un hilo de un metro, aproximadamente, de longitud, o incluso menos.

Hay varias formas de utilizar una lámpara triodo para la amplificación. Examinando la parte recta de la característica pueden apreciarse las posibilidades de amplificación de una lámpara triodo. A causa de la pendiente de esta recta, una variación muy pequeña del potencial de rejilla se traduce por una gran variación de la intensidad de la corriente de placa.

Si se quiere amplificar una corriente variable, bastará con enviarla al primario de un transformador cuyo secundario se halle conectado con la rejilla, estando esta última correctamente *polarizada* por la pila P. Las variaciones del potencial de rejilla que resultarán (*a*) producirán variaciones de las corrientes de placa (*b*) de amplitudes mayores que las de la corriente variable que se aplica al primario del transformador: se dice entonces que la lámpara triodo desempeña la función de *relevador amplificador*. Si la amplificación se considera insuficiente, se envía esta corriente de placa al primario de un segundo transformador cuyo secundario está conectado con la rejilla de una segunda lámpara, y así sucesivamente, con lo cual se realiza una amplificación en varias fases. El número de estas fases queda limitado, prácticamente, a tres, por razones de estabilidad. El transformador debe adaptarse a la frecuencia de la corriente que hay que amplificar; existen transformadores para baja frecuencia (hasta 10 kilociclos) y para alta frecuencia (por encima de 10 kilociclos).


Puesto de maniobra de agujas de la estación de Montereau (Francia)

Hay también otros métodos para acoplar las lámparas amplificadoras, ya introduciendo resistencias, ya introduciendo un circuito oscilante (bobina de autoinducción y capacidad en paralelo): éste es el *amplificador de resonancia*, empleado principalmente en las ondas cortas. Una misma lámpara puede, además, amplificar simultáneamente corrientes de frecuencias diferentes, para lo cual basta con disponer los circuitos de tal forma que únicamente atraviese la corriente conveniente el circuito que le corresponde (*reflex*).

La amplificación puede hacerse sobre la corriente de alta frecuencia procedente de la antena receptora o sobre la de baja frecuencia que sale del montaje detector (*fig.* 644), utilizándose, por lo general, las dos. La primera confiere una gran sensibilidad a la estación receptora, porque se pueden amplificar considerablemente las corrientes muy débiles que inducen en la antena las emisoras lejanas o débiles. La segunda permite que una corriente de baja frecuencia modulada actúe no sólo sobre un auricular, sino también sobre un altavoz.

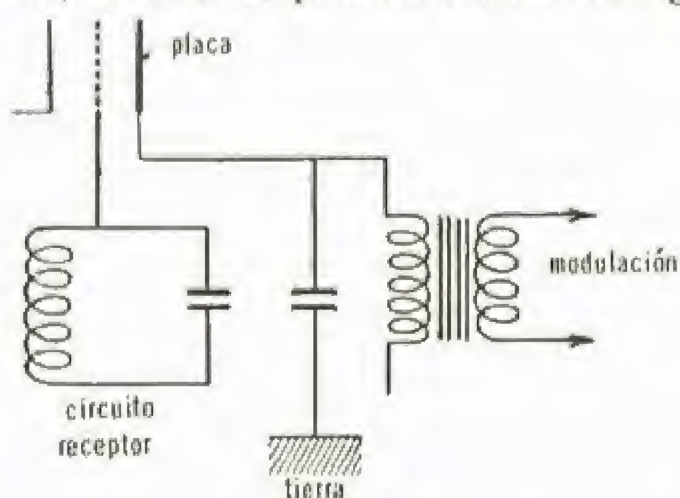
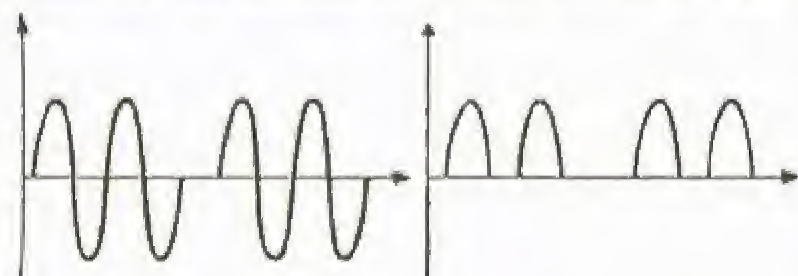


Fig. 644

Los primeros altavoces eran una aplicación del principio del auricular telefónico (v. TELEFONÍA, pág. 217). En la actualidad se emplea el altavoz electrodinámico, constituido por una culata de hierro con núcleo central; el núcleo lleva un devanado de excitación que da las polaridades magnéticas. En el entrehierro se coloca una bobina móvil solidaria de un cono difusor; al atravesar la bobina móvil una corriente telefónica, adquiere un movimiento de traslación en el entrehierro, y arrastra el cono que actúa sobre el aire a la manera de un émbolo. Cuando el cono avanza, crea ante él una onda de compresión y tras él otra de depresión; como ambas ondas tienden a compensarse, el cono difusor se monta sobre una pantalla.

El *altavoz electrostático* tiene una membrana metálica muy ligera, colocada entre dos rejillas muy próximas, que están sometidas a tensiones continuas y opuestas de varios millares de voltios, estando la membrana polarizada por la corriente de baja frecuencia que hay que reproducir. De esta forma, el diafragma difusor es sometido en su totalidad a las fuerzas electrostáticas de atracción.

Recepción de las señales telegráficas. — Las señales Morse que se emiten en ondas sostenidas están compuestas de trenes de ondas continuas y no amortiguadas (*fig.* 645) en la recepción, que, después de rectificadas, darán una corriente como la que muestra la figura 646. La corriente, desde el momento en que empieza a pasar, atrae la membrana de un auricular, que recobrará su posición primitiva cuando se anule la corriente. Esto ocurrirá a la frecuencia de las señales, es decir, de manera relativamente lenta; no se oirá, pues, nada. Para remediar esto se produce en el receptor una onda de frecuencia F próxima a la del emisor. Entre ambas ondas intervienen batimientos de frecuencia $F - f' = f$ (que se disponen de forma que f sea una frecuencia audible). La corriente que recorre el auricular es, por lo tanto, una corriente de baja frecuencia f que produce un sonido, oyéndose una sucesión de sonidos interrumpidos por silencios que reproducen la señal.


Fig. 645 *Fig.* 646

Recepción en superheterodino. — En todas las estaciones modernas se utiliza un procedimiento análogo al anterior para la recepción en ondas moduladas, pero, en estos casos, la frecuencia f escogida es mayor que las frecuencias audibles; constituye la frecuencia media, que se amplifica lo mismo que las altas y bajas frecuencias. La recepción en superheterodino permite una gran selectividad y una amplificación casi infinita.

Progresos recientes en las radiotransmisiones. — Éstas son, sobre todo, la producción de ondas ultracortas, llamadas también centimétricas o hiperfrecuencias, y la utilización de la modulación de frecuencia en lugar de la modulación de amplitud.

Una onda de frecuencia F, modulada en amplitud por una señal de frecuencia f (por jeemplo, una onda musical), se comporta como la superposición de tres ondas de frecuencias $F - f$, F, y $F + f$, respectivamente. El receptor sintonizado con el emisor debe dejar, pues, pasar una banda de frecuencias comprendidas entre $F - f$ y $F + f$, es decir, de anchura $2f$. El valor de f depende también de la señal que haya que transmitir; en telegrafía manual es de aproximadamente 10 ciclos/segundo; la telefonía requiere varios millares; la música, 15 000, y la televisión de alta definición, 12 megaciclos. Para asegurar una buena selectividad en la recepción, la relación $2f/F$ debe estar comprendida entre 1/10 y 1/100. Por consiguiente, para la televisión de alta definición, la frecuencia portadora debe ser por lo menos de 120 megaciclos, lo que corresponde a una onda de 2,5 m; ésta es la primera ventaja de las ondas ultracortas, que también presentan otros aspectos interesantes. Acabamos de ver que la transmisión musical exige una banda de frecuencia de 15 000 ciclos; como el conjunto de las ondas de más de 30 cm tienen sus frecuencias entre 0 y 1 000 megaciclos, las estaciones que emiten música en esas frecuencias deberán estar espaciadas 15 000 ciclos como mínimo; lo mismo ocurrirá para las que emiten con ondas de 3 a 30 cm, pero como sus frecuencias van de 1 000 a 10 000 megaciclos, podrán ser 9 veces más numerosas que las primeras, lo que permite comprender el interés que presentan estas ondas ultracortas. Por último, se dejan dirigir más fácilmente que las restantes ondas, lo que hace perfectamente posible concentrar la energía sobre un receptor dado y, además, asegurar el secreto de la transmisión. A esos haces de ondas ultracortas se les ha dado el nombre, bastante audaz, de "cables hertzianos".

La modulación de frecuencia es, en principio, análoga a la modulación de amplitud; la frecuencia de la onda portadora varía según la señal que se haya de transmitir, permaneciendo la amplitud constante. Este género de modulación presenta ciertas ventajas: eliminación fácil de los parásitos; débil consumo de corriente durante la emisión y extensísima posibilidad de modular.

A causa de las dos primeras, la modulación de frecuencias se utiliza en las emisoras móviles (carros de asalto, coches de policía, etc.). La tercera permitiría una transmisión mucho más fiel de las emisiones musicales, pero para conseguirlo habría que cambiar, desgraciadamente, todas las emisoras y todos los receptores actuales.

Ondas dirigidas

Se ha procurado siempre limitar a un sector lo más estrecho posible la radiación de ondas, de forma que no se impresionen más que los receptores situados en ese sector, y alcanzar de esta forma puntos muy distantes con un gasto mínimo de energía. Con las ondas ultracortas se alcanza fácilmente este resultado, si bien ya se habían obtenido soluciones parciales con ondas más largas.

Dirección de las ondas largas. Cuadros. — Supongamos que dos antenas AA′ y BB′ están conectadas como indica la figura 647. Al ser recorridas por la misma corriente en el sentido inverso, ejercerán efectos iguales y opuestos sobre un punto P de yy', situado a igual distancia de A y B.

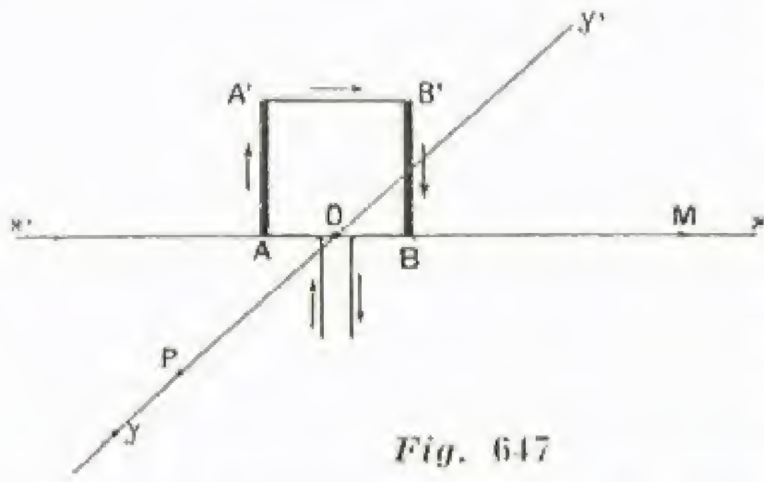


Fig. 647

En M, en cambio, las dos radiaciones no llegarán unidas, puesto que una de ellas tendrá que recorrer el camino suplementario AB.

Su acción diferencial no será nula y el sistema radiará en dos direcciones: *ox* u *ox'*. El razonamiento es el mismo para un cuadro receptor. Estas propiedades de los cuadros se aplican a los radiofaros —cuadro emisor— y a la radiogoniometría —cuadro receptor.

Dirección de las ondas cortas. — Las radiaciones de varias antenas, espaciadas a intervalos iguales a un cuarto o a la mitad de la longitud de onda, se interfieren; las ondas se concentran en el plano de las antenas, cuyas radiaciones se añaden. Por ejemplo, en el sistema Beam, 16 antenas unifilares situadas en un plano vertical y excitadas simultáneamente, están espaciadas un cuarto de longitud de onda. A una semilongitud de onda de este plano hay otro plano, vertical, formado por 32 hilos verticales de la misma altura que las antenas. Este segundo plano constituye lo que se llama un reflector. Se demuestra que el reflector proporciona la máxima radiación en la dirección perpendicular al plano de los hilos y una radiación sensiblemente nula en la dirección de este plano; las antenas y reflectores están sostenidos por pilones de 100 m de altura.

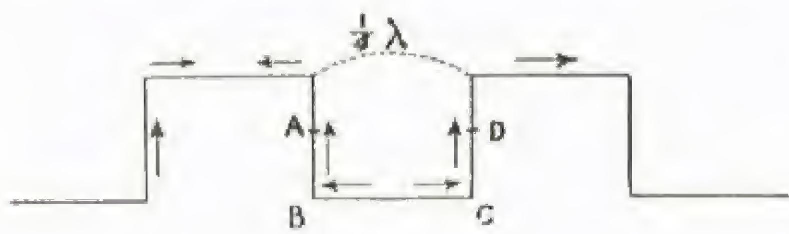


Fig. 648

Este sistema puede perfeccionarse empleando dispositivos alimentados en un solo punto y en los cuales se produce automáticamente el desfasaje de una antena a otra. En la disposición en mosaico, el mismo hilo tiene alternativamente porciones verticales y horizontales.

La longitud ABCD del hilo (*fig.* 648), comprendida entre los puntos medios A y D de dos hilos verticales consecutivos, se dispone de forma que sea igual a una semilongitud de onda. Como los hilos consecutivos son de sentido inverso, están recorridos por corrientes en fase: las porciones horizontales difunden una radiación que no desempeña ningún papel de importancia.

En la disposición en forma de dientes de sierra (*fig.* 649), la longitud de cada porción, como la AB, es igual a una semilongitud de onda, de forma que la corriente cambia de sentido cuando se pasa de una porción AB a la consecutiva BC. Se ve fácilmente que las componentes verticales de las corrientes se añaden, mientras que las horizontales se destruyen.

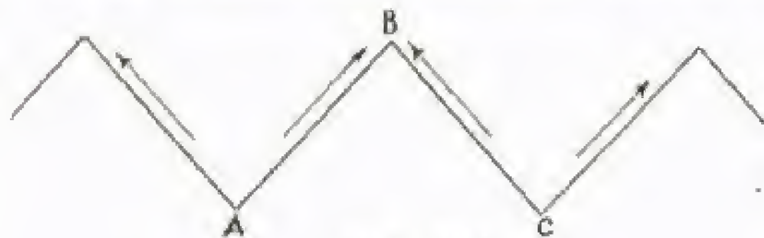


Fig. 649

Para la recepción se utiliza un sistema de antenas análogas a las de emisión.

Caso de las ondas ultracortas. — Las ondas ultracortas tienen la propiedad de que pueden ser dirigidas por aparatos que recuerdan los espejos y las lentes que se utilizan para las ondas luminosas. De hecho, todas las ondas poseen esta propiedad, pero como los aparatos deben tener dimensiones muy grandes, proporcionales a la longitud de onda, serían verdaderamente irrealizables cuando las ondas fueran muy cortas. Se construyen hoy proyectores parabólicos de una substancia conductora; en sus focos se coloca la antena emisora, cuyas dimensiones son del orden de la longitud de onda y se obtiene así un haz de ondas paralelas. También se utilizan "trompetas" electromagnéticas que desempeñan para las ondas hertzianas la misma función que los megáfonos para las ondas acústicas.


Tipo de antena moderna. Antena parabólica de la torre Eiffel (*Fot. Radio-Tél. Française*)

Propagación de las ondas electromagnéticas

La capa de Kennely-Heaviside. — Cuando se hicieron los primeros ensayos de enlace por radio entre Europa y América, los cálculos de propagación de una onda electromagnética en el espacio indicaban, dada la potencia de los emisores de que entonces se disponía, que este enlace no era posible. Sin embargo, se logró perfectamente. Por consiguiente, se producía un fenómeno desconocido en la propagación de las ondas por la superficie de la Tierra; pronto se descubrió que se trataba de una reflexión sobre una capa de electrones situada en la alta atmósfera: esta capa se designa con el nombre de *ionosfera*, o *capa de Kennely-Heaviside* (*fig.* 650). La altura y el espesor de esta capa varían según la actividad solar y la hora del día entre unos 80 y 300 km; su acción varía también según la longitud de onda.

Las ondas largas de más de 1 000 metros son totalmente reflejadas y no penetran en dicha capa; la energía radiada permanece, en ese caso particular, entre la Tierra y la ionosfera, sin dispersarse por el espacio; se comprende entonces el considerable alcance que tienen tales ondas reflejadas.

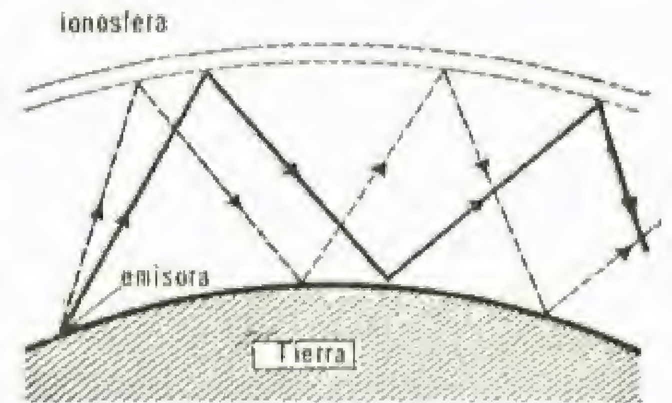


Fig. 650

La penetración de las ondas medias (de hasta 100 m aproximadamente), es tanto mayor cuanto más corta es su longitud de onda. Todas ellas son finalmente reflejadas, pero con una mayor o menor atenuación según su penetración (*figs.* 651 y 652). Las ondas cortas 10 a 100 metros son reflejadas solamente si llegan a la capa con un gran ángulo de incidencia, de lo que resulta una "zona de silencio" en la cual no puede oírse la emisora (v. *fig.* 652); más allá de esta zona de silencio pueden recibirse las señales. Estas reflexiones provocan a veces acumulaciones de energía en ciertos puntos, lo que explica los extraordinarios enlaces radioeléctricos que se obtienen con países, tan lejanos como los de los Antípodas, con potencias muy débiles. Pero estos enlaces son inestables.

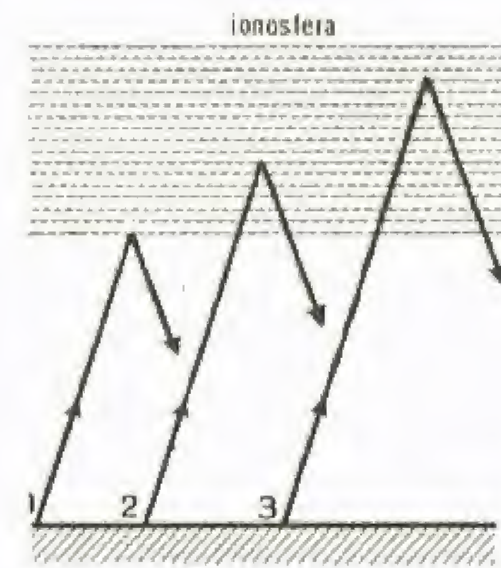


Fig. 651. — Reflexión de las ondas de más de 1 000 metros (1), de más de 100 metros (2), de aproximadamente 100 metros (3)

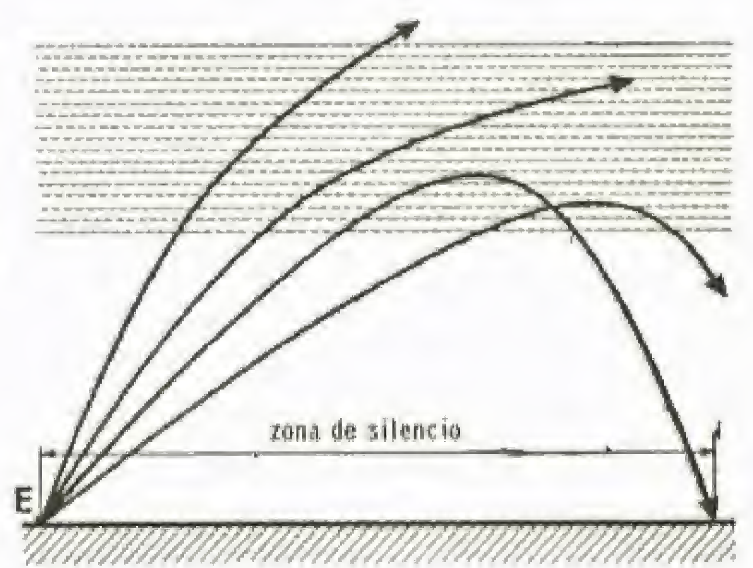


Fig. 652. — Reflexión de las ondas de 10 a 100 metros

Con las ondas ultracortas de menos de 10 m no se produce reflexión; así, para que puedan captarse es necesario que la emisora sea visible desde el puesto receptor, ya que la propagación se hace únicamente en línea recta.

La capa de Heaviside no está inmóvil, sino en movimiento; este movimiento explica los efectos de *desvanecimiento (fading)*, es decir, de debilitación y refuerzo de las recepciones.

El conocimiento de la ionosfera es muy importante para todo lo que se refiere a la eficacia de los enlaces radioeléctricos.

Para esto se efectúan sondajes por medio de ondas de diversas frecuencias, observándose los ecos de estas ondas en la estación emisora. Así se llega a conocer la longitud de onda más apropiada para transmitir un mensaje de un punto a otro: para dos puntos dados, el resultado varía según el día, e incluso según diferentes horas. Estas variaciones pueden llegar a predecirse con bastante exactitud, con varios días, meses e incluso años, de antelación. Ello es posible porque la ionosfera depende esencialmente de la actividad solar.

En virtud de lo anterior, cuando se quiere comunicar por radio con un punto situado fuera de nuestra atmósfera —un cohete astronáutico, por ejemplo— habrá que emplear ondas ultracortas. El "Signal Corps" (Cuerpo de Transmisiones) del ejército americano consiguió, en 1947, recibir el eco de un mensaje enviado a la Luna utilizando ondas ultracortas dirigidas y potencias instantáneas de hasta cinco millones de vatios.

Televisión

Reseña histórica. Principios. Emisión. Recepción. Ondas utilizadas en la televisión. Televisión en colores

Reseña histórica. — **Bain,** en 1843, **Backwell,** en 1847, y **Caselli,** en 1855, establecieron el principio de la transmisión a distancia de dibujos o autógrafos, empleando la exploración por contacto y una recepción electroquímica. En 1873 se descubrieron las propiedades fotoeléctricas del selenio. Ya en 1875, **Carey** ideó una retina artificial compuesta de un gran número de elementos de selenio sobre la cual se había de formar la imagen real del objeto; las células del selenio habían de conectarse con minúsculas lámparas eléctricas dispuestas en un cuadro receptor sobre el que esperaba construir luego la imagen. **Sawyer** tuvo la idea, en 1877, de extender a la televisión el sistema de la exploración punto por punto, aplicando el principio de la persistencia de la impresión retiniana.

Maurice Leblanc, en 1880, imaginó la exploración por espejos oscilantes; en 1881, **Lenoir** reprodujo, por medio de gelatina bicromatada, pruebas fotográficas. En 1884, **Nipkov** inventó el disco que lleva su nombre; **Weiller,** en 1889, construyó un tambor con espejos y, en 1907, **Rosing** expuso los principios del método llamado del oscilógrafo catódico. **Baird** transmitió su primera imagen en 1928.

Principios. — El objeto de la televisión es que el espectador pueda contemplar escenas que se desarrollan a gran distancia; es diferente, pues, de la fototelegrafía que, aunque por procedimientos análogos, transmite sólo fotografías y no escenas o personajes en movimiento.

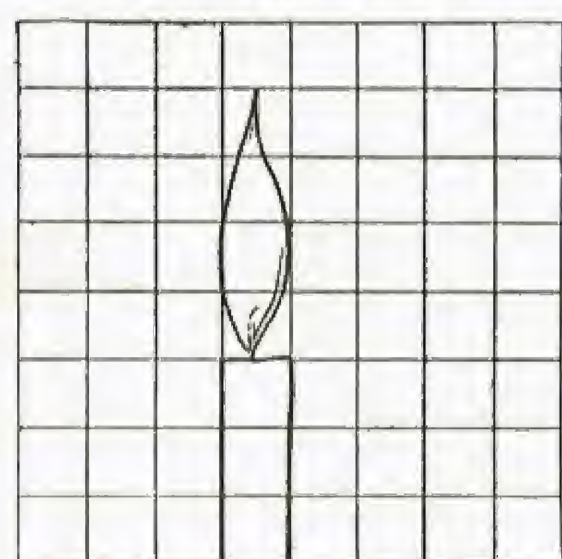


Fig. 653

Los sistemas actuales de televisión están basados en los principios de la reproducción fotográfica en similigrabado y en los de la cinematografía. Consideremos una imagen en blanco y negro, cuadrada, por ejemplo (*figura* 653); esta imagen puede descomponerse en gran número de cuadrados pequeños, definiéndose para cada uno de ellos por un matiz intermedio entre el negro y el blanco. Llevando estos pequeños cuadrados, con su matiz intermedio, a un gran cuadrado que tenga las dimensiones de la imagen inicial —o dimensiones diferentes, pero dividido en un mismo número de pequeños cuadrados— habremos reproducido la imagen. Esta reproducción será tanto más fiel cuanto más pequeños sean los cuadrados en que se divide. Éste es el esquema de la reproducción fotográfica en similigrabado. Si se examina una cualquiera de las ilustraciones de este volumen, se comprobará que está constituida por pequeños puntos negros, blancos y grises, separados entre ellos.

Para una dimensión dada de la imagen que ha de reproducirse, el número de los cuadrados divisionarios será el índice de fidelidad de la reproducción.

En realidad, y por razones que se expondrán más adelante, en la televisión no se utiliza un número de cuadrados, sino un número de líneas que es la raíz cuadrada del primero; esto es lo que se llama *definición.* Cuanto mayor es el número de líneas, mayor es la definición. En Inglaterra se utilizan 405 líneas, en América, 525, y en Francia, 819.

La luz procedente de un cuadrado de la división es enviada sobre una célula fotoeléctrica (v. TEORÍAS MODERNAS, pág. 157), que emitirá una corriente proporcional a la intensidad luminosa que recibe, es decir, a la iluminación del cuadrado considerado. Los valores relativos de las corrientes así producidas, que corresponden a cada cuadrado, pueden transmitirse por radio. En la recepción, se iluminarán los cuadrados de una trama, idéntica a la que ha descompuesto la imagen original, proporcionalmente a los valores transmitidos por radio. Si el tiempo que separa la recepción, y por lo tanto también la emisión, de los valores de iluminación del primero y del último de los cuadrados es inferior a 1/10 de segundo, la persistencia de las impresiones retinianas hará que se vea una imagen en vez de una sucesión de puntos más o menos luminosos. En la práctica, para evitar el "centelleo", es necesario que la duración de transmisión de la imagen sea de 1/24 de segundo. La división de las imágenes en cuadrados es, naturalmente, ficticia, lo mismo que, por ejemplo, la de la Tierra en paralelos y meridianos.

Si se adopta una definición de 400 líneas, que es el mínimo actual, se tendrán 400 × 400 cuadrados a transmitir en 1/24 de segundo, o sea cuatro millones, aproximadamente, por segundo. En una definición de 800 líneas, esta cifra, naturalmente, se cuadruplica.

Emisión. — Las anteriores cifras muestran, sin necesidad de explicación, que es imposible explorar una imagen a razón de varios millones de puntos por segundo con un dispositivo puramente mecánico. Por consiguiente, no haremos más que mencionar los que se imaginaron primitivamente con este objeto: el disco de Nipkov y la rueda de espejos de Weiller.

Actualmente, para explorar una imagen sólo se emplean haces de electrones. El primer aparato de este género ha sido el disector de imágenes de Farnsworth, seguido del iconoscopio de Zworykin, del cual derivan los aparatos actualmente utilizados.

Aparato de televisión de 819 líneas (*Doc. Grammont*)

El iconoscopio de Zworykin (*fig.* 654) tiene gran número de pequeñas superficies fotoeléctricas constituidas por minúsculos granos de plata depositados sobre una placa de mica M. Estos granos de plata han sido sometidos a un tratamiento especial que los hace fotosensibles. El conjunto de ellos es lo que se llama *mosaico;* detrás de la placa de mica M se encuentra una placa conductora C, conectada a un emisor de radio (que se ve esquematizado en la figura). Por medio de un objetivo L se forma sobre el mosaico la imagen de la escena que hay que televisar; bajo el efecto de la luz, cada uno de los pequeños elementos fotosensibles emite electrones, en mayor o menor cantidad, según la intensidad de la luz que reciba. Cada elemento que pierda electrones tiene una carga positiva. La superficie del mosaico es recorrida por un delgado haz de electrones producidos por el tubo T. Este recorrido o barrido, o sea la exploración de la imagen, se hace metódicamente línea por línea, de abajo arriba, por ejemplo. El movimiento de los electrones del barrido se obtiene con un campo eléctrico variable (v. TEORÍAS MODERNAS, pág. 151). Cuando el haz de electrones es proyectado sobre uno de los granos de plata, neutraliza su carga positiva. El pequeño condensador formado por este grano, la placa de mica y la placa conductora C se descargan, y esta corriente de descarga es transportada al emisor, en donde es amplificada y transmitida.

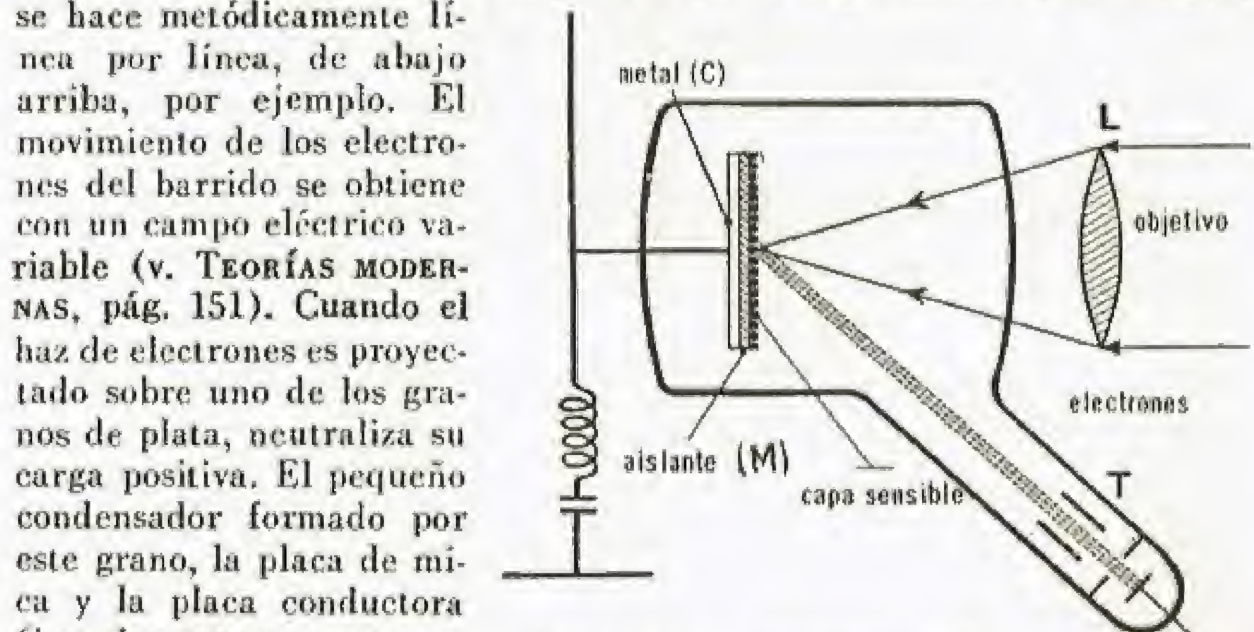


Fig. 654. — Esquema del iconoscopio de Zworykin

Naturalmente, entre dos pasos del haz de electrones el pequeño grano de plata se carga de electricidad positiva bajo el efecto de la luz que recibe, es decir, que en cierta manera, acumula luz. Sin embargo, el grano de plata, al cargarse positivamente, atrae los electrones que se encuentran en su proximidad, lo que hace que no alcance la carga máxima que cabía esperar. A pesar de ello, el iconoscopio representa un gran progreso sobre el disector de imágenes de Farnsworth, ya que este último exigía intensas iluminaciones, mientras que el iconoscopio permite obtener todavía buenas imágenes con iluminación de 300 lux (v. ALUMBRADO, pág. 188). El iconoscopio se ha perfeccionado con el orticón, en el cual el barrido o recorrido del mosaico es efectuado por electrones lentos, y después con el supericonoscopio, en donde se utiliza una amplificación por electrones secundarios. Este procedimiento es el que se emplea en la imagen-orticón, el más reciente progreso de la técnica, que pasamos a describir. Pero resumamos de nuevo el fenómeno de la emisión de electrones secundarios: cuando electrones acelerados por una tensión de varios centenares de voltios inciden sobre una placa metálica, ésta emite a su vez electrones en una proporción que puede llegar a 10 electrones por cada electrón incidente (v. TEORÍAS MODERNAS, pág. 158).

En la imagen-orticón, la imagen que hay que televisar se forma sobre una capa fotoeléctrica semitransparente S (*fig.* 655). Un punto P de esta imagen es una fuente de electrones. Por medio de una lente electrónica, estos electrones se concentran en un punto P′, imagen electrónica de P. P′ se encuentra sobre una placa de vidrio muy delgada (de sólo milésimas de milímetro de espesor), ante la cual hay una rejilla metálica sumamente fina. Los electrones que proceden de P′ provocan en P′ una abundante emisión de electrones secundarios que son captados por la rejilla. El punto P′ se carga entonces positivamente y, como el vidrio es aislante, las cargas permanecen en dicho punto. No obstante, su conductividad no es nula; así, cuando el haz de exploración producido en el tubo T toque el punto P′, éste se descargará por el

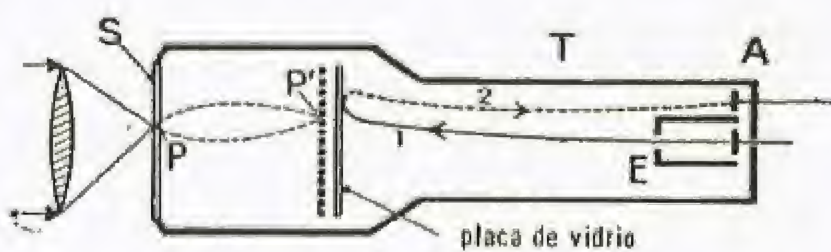
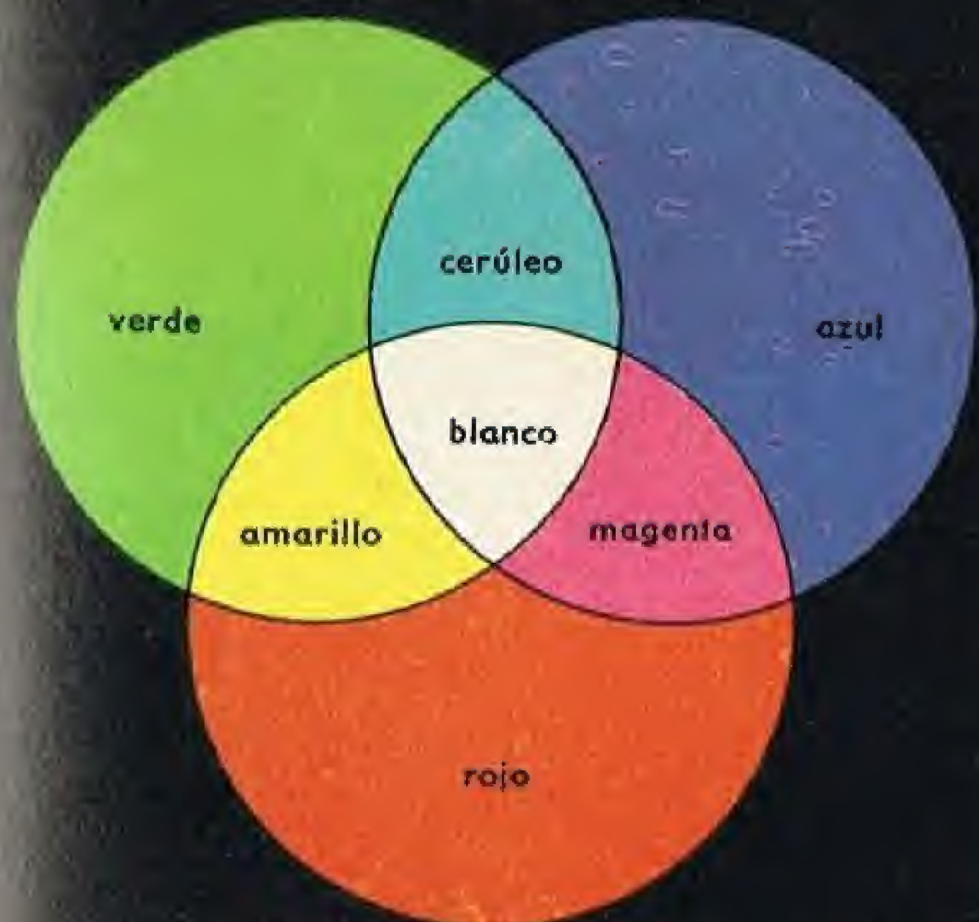


Fig. 655.—Principio de la imagen-orticón

COLORES

SÍNTESIS ADITIVA



cerúleo = azul verdoso   magenta = rosa acarminado

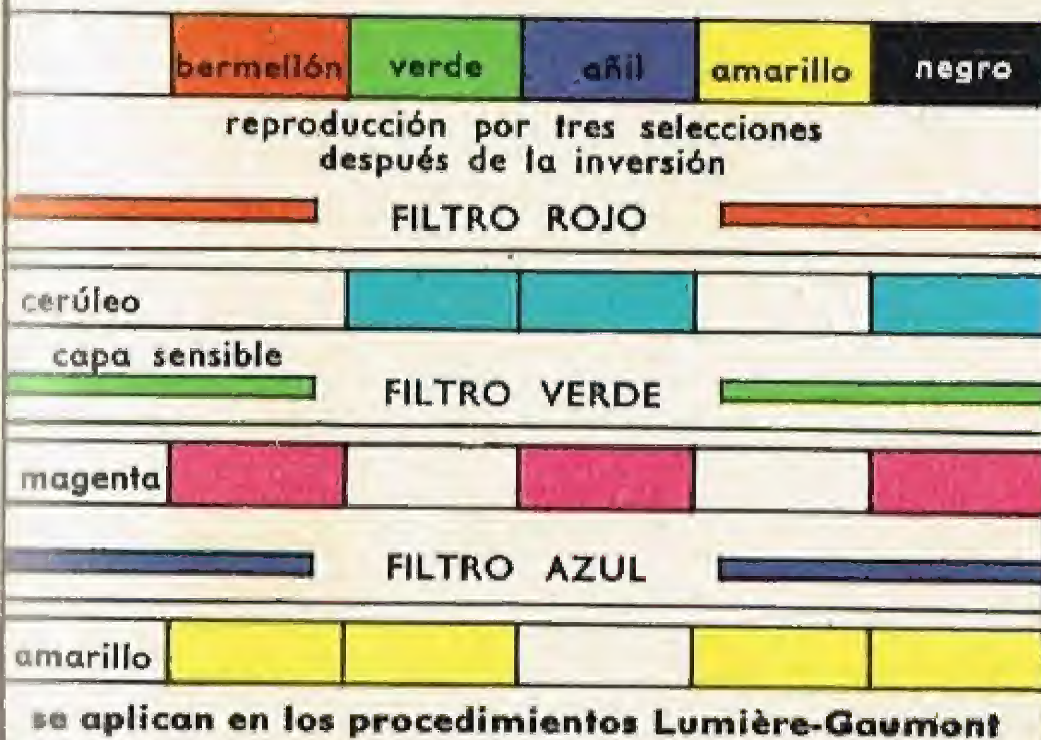
SELECCIONES TRICROMÁTICAS EN TIPOGRAFÍA
(Síntesis substractiva)

La imagen está dividida sobre toda su superficie en puntos, cuyo grueso es proporcional a los valores del negativo de selección. Los negros del negativo originan puntos pequeños, los grises puntos medianos y los blancos puntos grandes. Estos puntos reciben sobre el cliché las tintas de color, antes de depositarse por presión sobre el papel



SÍNTESIS SUBSTRACTIVA





se aplican en los procedimientos Lumière-Gaumont



selecciona el rojo
estos negativos de selección serán tramados en metal

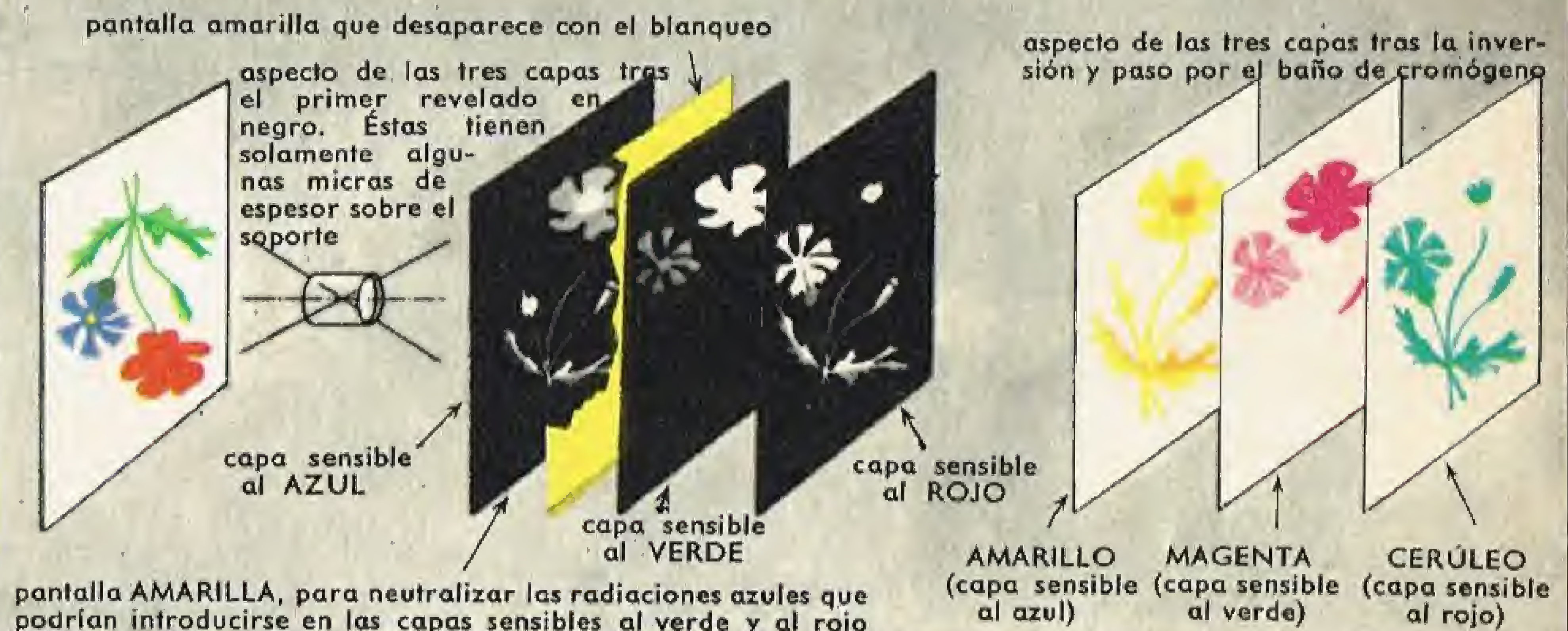
TOMA DE VISTAS SOBRE PELÍCULA LENTICULAR — SÍNTESIS ADITIVA

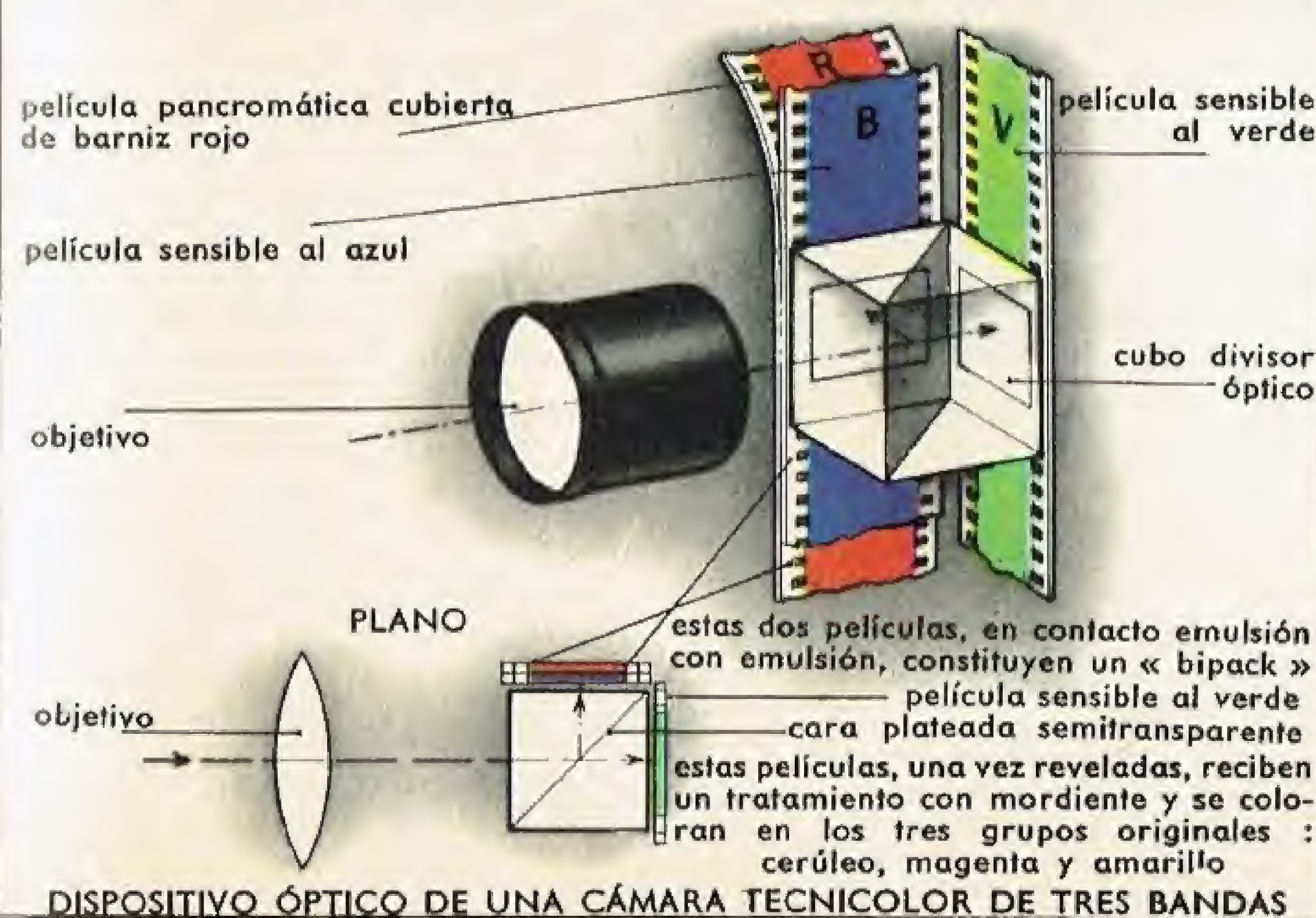
sistema inventado por Berthon. Explotado comercialmente con el nombre de « Kodacolor »

PRINCIPIO



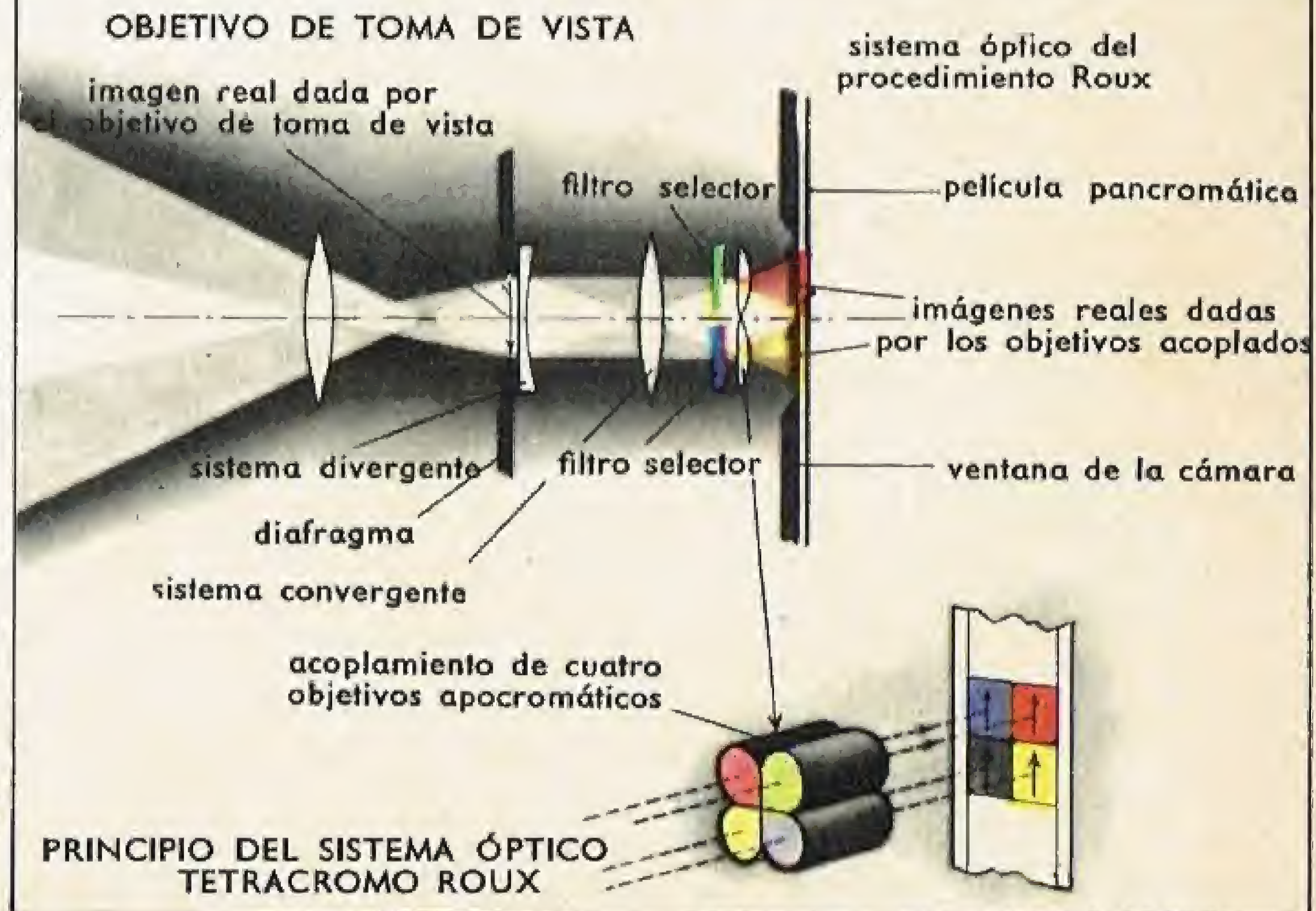
PRINCIPIO DE LA TRICROMÍA SUBSTRACTIVA, PELÍCULAS, MONOPACKS, AGFACOLOR, KODACHROME.



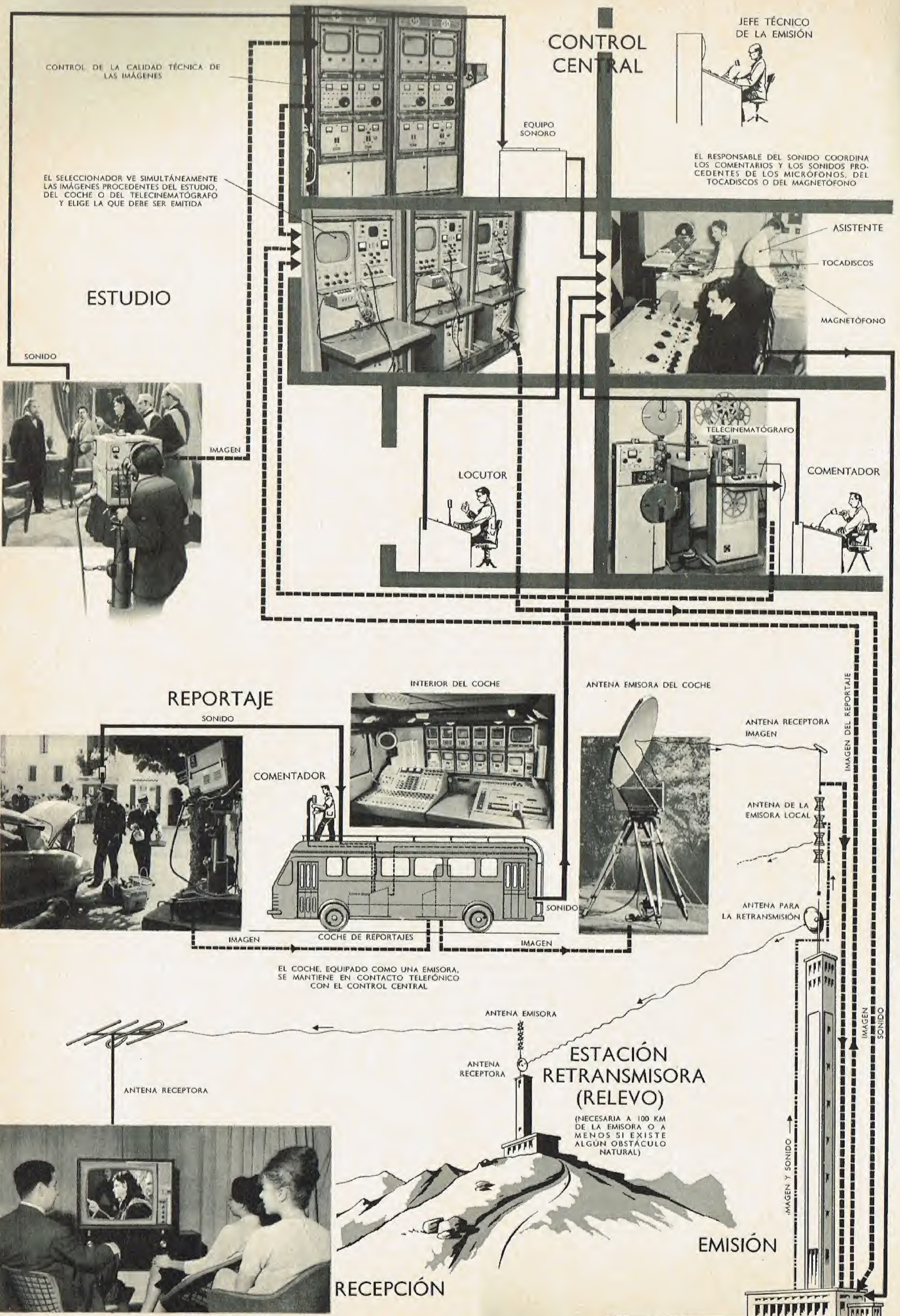


DISPOSITIVO ÓPTICO DE UNA CÁMARA TECNICOLOR DE TRES BANDAS

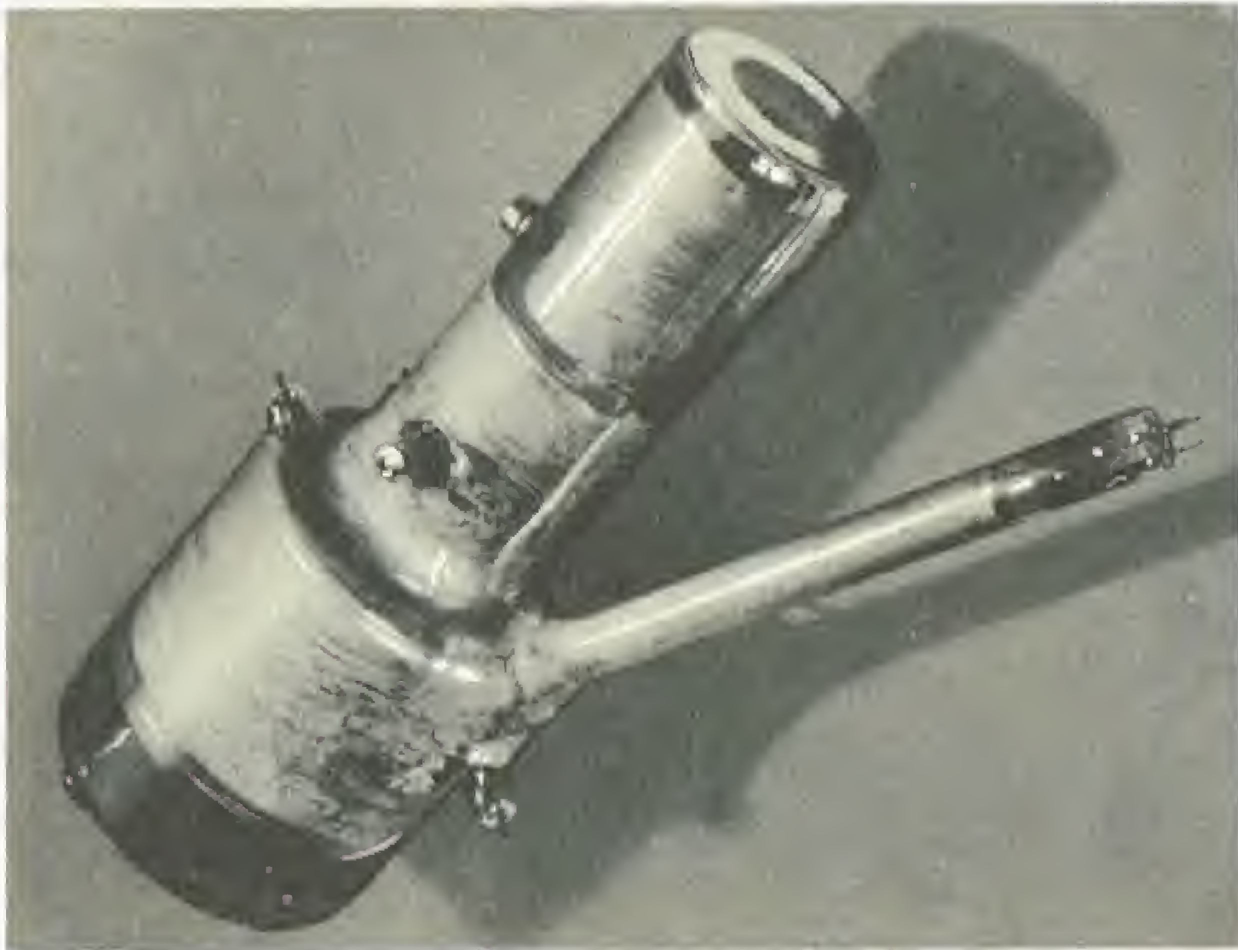
OBJETIVO DE TOMA DE VISTA



PRINCIPIO DEL SISTEMA ÓPTICO TETRACROMO ROUX


TELEVISIÓN
CONTROL CENTRAL
JEFE TÉCNICO DE LA EMISIÓN
CONTROL DE LA CALIDAD TÉCNICA DE LAS IMÁGENES
EQUIPO SONORO
EL RESPONSABLE DEL SONIDO COORDINA LOS COMENTARIOS Y LOS SONIDOS PROCEDENTES DE LOS MICRÓFONOS, DEL TOCADISCOS O DEL MAGNETÓFONO
EL SELECCIONADOR VE SIMULTÁNEAMENTE LAS IMÁGENES PROCEDENTES DEL ESTUDIO, DEL COCHE O DEL TELECINEMATÓGRAFO Y ELIGE LA QUE DEBE SER EMITIDA
ASISTENTE
TOCADISCOS
MAGNETÓFONO
ESTUDIO
SONIDO
IMAGEN
TELECINEMATÓGRAFO
LOCUTOR
COMENTADOR
REPORTAJE
SONIDO
INTERIOR DEL COCHE
ANTENA EMISORA DEL COCHE
ANTENA RECEPTORA IMAGEN
IMAGEN DEL REPORTAJE
COMENTADOR
ANTENA DE LA EMISORA LOCAL
ANTENA PARA LA RETRANSMISIÓN
SONIDO
IMAGEN
COCHE DE REPORTAJES
IMAGEN
EL COCHE, EQUIPADO COMO UNA EMISORA, SE MANTIENE EN CONTACTO TELEFÓNICO CON EL CONTROL CENTRAL
ANTENA EMISORA
ANTENA RECEPTORA
ESTACIÓN RETRANSMISORA (RELEVO)
(NECESARIA A 100 KM DE LA EMISORA O A MENOS SI EXISTE ALGÚN OBSTÁCULO NATURAL)
ANTENA RECEPTORA
IMAGEN
SONIDO
IMAGEN Y SONIDO
EMISIÓN
RECEPCIÓN

espesor sumamente pequeño del vidrio. El exceso de electrones del haz se reflejará y, siguiendo el trayecto marcado 2 sobre la figura, chocará con un electrodo E, que emitirá a su vez electrones secundarios; estos electrones, si es preciso después de otras multiplicaciones por medio de electrones secundarios, serán captados por el ánodo A, que lanzará la señal que haya que emitir. En este aparato, como se observará, se utiliza la emisión secundaria para amplificar considerablemente el número de



Tubo analizador de televisión

electrones emitidos por una superficie fotosensible. La imagen-orticón permite televisar fácilmente vistas tomadas al claro de luna (0,2 lux).

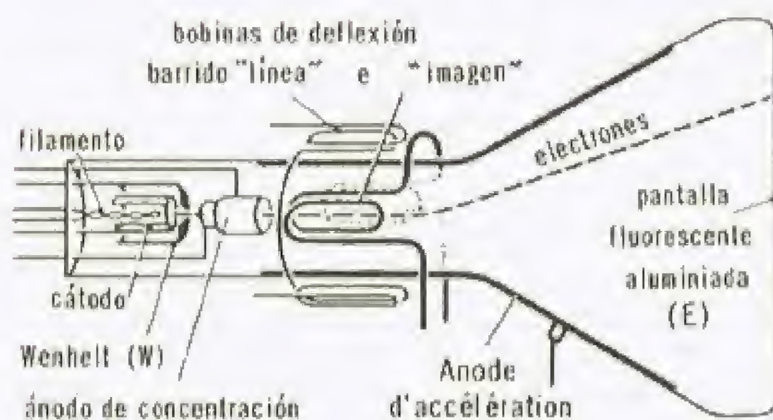


Fig. 656. — Esquema de un tubo receptor

Se ha dicho que la exploración de la imagen se hacía línea por línea, empezando, por ejemplo, por la parte superior. Esto no es completamente exacto, ya que se ha comprobado que se obtenían mejores imágenes recorriendo primeramente las líneas de orden impar, y una vez terminado este recorrido, volviendo hacia atrás para barrer las líneas de orden par.

Recepción. — Consta de un aparato receptor, detector y amplificador de las ondas hertzianas; la corriente modulada así obtenida actúa sobre el haz de electrones de un tubo de rayos catódicos. Este último *(fig.* 656) está constituido de tal forma que su haz de electrones efectúa sincrónicamente las mismas operaciones de barrido que el del aparato emisor. Un electrodo W, llamado *electrodo de Wehnelt*, dotado de potencial negativo, permite modificar la intensidad del haz según sea más o menos elevado su potencial negativo. A este electrodo es donde llega la intensidad modulada del aparato receptor. La intensidad del haz de electrones será, por lo tanto, mayor o menor según la señal emitida. Al ser proyectado sobre una pantalla fluorescente E, este haz producirá en ella manchas luminosas cuyas intensidades estarán en la misma relación que tenían en la imagen emitida.

Es evidente que, en todo lo anterior, se supone un sincronismo perfecto entre ambos haces de electrones, el de partida y el de llegada, ya que en caso contrario, por ejemplo, si el haz de llegada estuviese con retraso con respecto al de emisión, este retraso se iría acentuando con cada línea y alcanzaría rápidamente proporciones tales que toda la imagen aparecería borrosa. Como es imposible conseguir un sincronismo perfecto, el remedio es el siguiente: después de cada línea, el emisor emite una señal de final de línea que lleva el haz de recepción al principio de la línea siguiente. Lo mismo se hace cuando se acaba la emisión de una imagen. Una señal diferente viene a reemplazar el haz de recepción al principio de la imagen; de esta forma, el retraso de la sincronización no puede tener efecto más que sobre una línea y permanece siempre igual. Como, a pesar de todo, se puede realizar una sincronización bastante perfecta, la imagen no sufre, en general, de las pequeñas desviaciones que puedan producirse.



Cámara de televisión (*Doc. Radio-Industrie*)

Ondas utilizadas en la televisión. — Una definición de 400 líneas corresponde, como se ha visto, a una frecuencia de señales de cuatro millones por segundo. Como la frecuencia portadora debe ser,



Tubo receptor de televisión con desviación electrostática (diámetro de la pantalla, 18 centímetros)

como mínimo, diez veces la de la corriente modulada, se ve que la frecuencia mínima de las ondas de televisión es de 40 megaciclos, lo que corresponde a una longitud de onda de 7,5 m. Por consiguiente, para la televisión sólo pueden utilizarse ondas ultracortas. Estas ondas (v. pág. 222) no pueden recibirse más que desde los puntos en que sea visible la antena emisora. Salvo casos particulares (antenas colocadas en montañas), el alcance de una estación emisora de televisión apenas llega a más de cien kilómetros, y esto sea cual fuere la potencia de la emisora. Para remediar esto se establecen relés, transmitiéndose las corrientes moduladas desde la emisora al relé por cables, con arreglo a la técnica de las corrientes portadoras (v. TELEFONÍA, p. 217).

Televisión en colores. — En la televisión en colores, que ya se utiliza en los Estados Unidos de América, se emplean varios sistemas que tienen analogía con los procedimientos del cine en colores. En el sistema R. C. A., se forman tres imágenes de la imagen que hay que transmitir con tres filtros de colores amarillo, rojo y azul (v. FOTOGRAFÍA DE LOS COLORES, pág. 227), que son transmitidos por tres aparatos distintos. Para la recepción se dispone igualmente de tres aparatos, y, por medio de un sistema óptico, se proyectan las tres imágenes superpuestas sobre una misma pantalla. En el sistema C. B. S., no se dispone más que de un aparato emisor, que transmite sucesivamente una imagen amarilla, otra azul y otra roja por medio de un disco con sectores coloreados que gira entre el aparato —llamado cámara— y la imagen que se televisa. En la recepción, que únicamente necesita de un solo aparato, hay un disco especial con sectores coloreados que gira sincrónicamente con el disco del emisor. En el sistema C. T. I., se forman sobre el orticón tres imágenes contiguas, a través de tres filtros, obteniéndose, en la recepción, tres imágenes coloreadas sobre la pantalla fluorescente del tubo catódico. Estas tres imágenes se revelan sobre la pantalla de observación por medio de tres objetivos. Por último, uno de los procedimientos más recientes de la televisión en colores es el llamado de *altas frecuencias mezcladas*, cuyo principio consiste en obtener la imagen en colores en la recepción por medio de tres haces electrónicos que corresponden a los tres colores fundamentales: la pantalla fluorescente se compone de puntos que se hacen azules, rojos o amarillos bajo la acción de los electrones. Cada punto tiene una superficie igual a la tercera parte de la mancha formada por el haz triple; según la señal emitida, los tres haces excitarán más o menos los puntos coloreados de la pantalla. El procedimiento es análogo al de la escuela de pintura llamada "puntillista".

Conservación de imágenes y de sonidos

La fotografía

Reseña histórica. El objetivo. El obturador. Tiempo de exposición. El negativo. Revelado de los clisés. Fijado. Tiraje del positivo. — **Fotografía de los colores:** Reseña histórica. Procedimiento Lippmann. Principio de la tricromía. Procedimiento Ducos du Hauron. Placas autocromas Lumière. Fotografía en relieve. Evolución de la fotografía. Aplicaciones diversas de la fotografía

Reseña histórica. — A mediados del siglo XVI, un sabio napolitano, **J.-B. Porta** (1541-1615), consiguió obtener, sobre el fondo de una cámara obscura en una de cuyas caras se había practicado un orificio, la imagen invertida de objetos muy iluminados situados fuera de la cámara; después, colocando una lente convergente en el orificio agrandado, comprobó que las imágenes eran cada vez más claras y que estaban mejor iluminadas: se había creado la cámara obscura. **Leonardo de Vinci** no desconocía este fenómeno, al que consagró estudios célebres. El alquimista **Fabricius,** por la misma época, observó que el cloruro de plata, llamado *luna córnea*, se ennegrecía a la luz, aunque fue sólo doscientos años más tarde cuando el físico **Charles** realizó la primera impresión fotográfica proyectando la silueta de uno de sus alumnos sobre una hoja de papel blanco impregnada de cloruro de plata; la silueta se percibía en blanco sobre fondo obscuro, aunque, naturalmente, esta imagen rudimentaria se desdibujaba a la luz. En 1802, **Wedgwood** reprodujo dibujos transparentes sobre una superficie sensibilizada con nitrato de plata y expuesta a la luz. **Nicéforo Niepce** (1765-1833) tuvo la idea de utilizar como materia sensible betún de Judea, que la luz altera y hace insoluble; estas imágenes son, pues, inalterables. Niepce comunicó sus experiencias a **Daguerre** (1787-1851), que comprobó que una placa de plata, yodurada mediante su exposición a los vapores de yodo, queda impresionada por la acción de la luz, y que la alteración, apenas visible, puede revelarse exponiéndola a los vapores de mercurio, y fijándola después con una solución de cianuro de potasio, que disuelve el yoduro inalterable.

Se trataba del *daguerrotipo* (1839), primera solución práctica del problema fotográfico. **Claudet,** en 1841, descubrió las substancias aceleradoras merced a las cuales se abrevia el tiempo de exposición. El inglés **Talbot,** por la misma época, reemplazó el daguerrotipo sobre metal por la fotografía sobre papel *calotipo*. **Niepce de Saint-Victor** (1805-1870), primo de Nicéforo, inventó una placa fotográfica: un vidrio cubierto con una capa de albúmina sensibilizada por yoduro de plata. **Maddox** y **Bennet,** de 1871 a 1878, descubrieron la placa de gelatinobromuro, muy importante. **Vogel,** en 1875, amplió la gama de las radiaciones *actínicas* —es decir, capaces de impresionar la placa fotográfica— sensibilizando las emulsiones con la mezcla de ciertos compuestos orgánicos. El desarrollo de la óptica permitió a su vez obtener objetivos más perfectos.

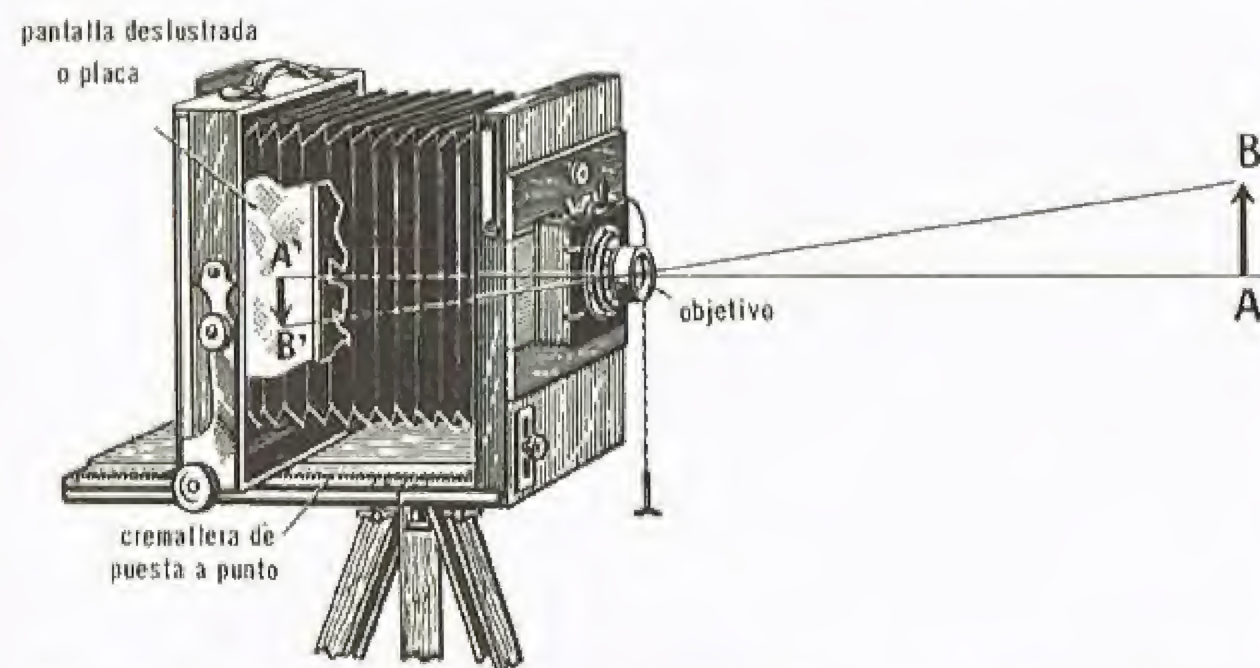


Fig. 657. — El objetivo da una imagen real, invertida y menor que el objeto, un poco más allá del foco, imagen que puede recibirse, gracias al fuelle, en una pantalla deslustrada

DEFINICIÓN. La **fotografía** *es el arte de fijar, sobre una placa de vidrio o una película de celuloide cubierta con una emulsión sensible a la luz, las imágenes obtenidas con una cámara obscura.* El revelado y el fijado de la superficie así expuesta dan un clisé negativo, con el que se obtiene, por reproducción, un número ilimitado de pruebas positivas.

El objetivo. — Es un sistema de lentes capaz de formar imágenes correctas (*fig.* 657). Una sola lente no podría dar imágenes aceptables para el fotógrafo, a causa de cierto número de defectos o aberraciones (aberraciones esférica y cromática, curvatura del campo, astigmatismo, etcétera) de que adolece. Los objetivos modernos llamados "anastigmáticos" corrigen todas estas aberraciones gracias a la combinación de varias lentes, a una juiciosa elección de la curvatura de los cristales que las componen, etc. (v. FÍSICA, pág. 93).

Un objetivo se caracteriza por su abertura relativa, que es la relación entre su diámetro y su distancia focal; así, un objetivo abierto a $f : 5$ tiene un diámetro igual a la quinta parte de su distancia focal f. La cantidad de luz que recibe la placa sensible aumenta a medida que se abre el objetivo. Actualmente pueden construirse objetivos de gran abertura, que llegan a $f : 1{,}5$ e incluso a $f : 1$.

La profundidad de campo es la distancia que separa dos planos entre los cuales todo objeto para una posición dada del objetivo dé una imagen neta.

La profundidad de campo depende de varios factores:

1º *Distancia del objeto al sujeto.* Es pequeña si la distancia es corta y grande si la distancia es larga; a una distancia considerable, puede llegar a ser infinita;

2º *Longitud focal del objetivo.* Es tanto menor, relativamente, cuanto más larga es la longitud focal;

3º *Abertura del diafragma.* Es tanto más pequeña cuanto más abierto está el diafragma.

El obturador. — Es un mecanismo que permite exponer a la luz, durante un tiempo variable, la superficie sensible situada en la cámara obscura.

Todos los obturadores actuales permiten hacer a voluntad la *exposición* (puesto que el operador acciona sucesivamente la abertura y el cierre) y la *instantánea* (en la que se desencadenan con un sólo movimiento automáticamente la abertura, y después, transcurrido un corto lapso de tiempo, el cierre de la cortinilla).

La duración de la abertura, en la instantánea, varía según los modelos desde 1/25 de segundo, en los más sencillos, hasta todas las velocidades comprendidas entre el segundo y la milésima o incluso la diezmilésima de segundo.

Existen numerosos modelos de obturadores, que pueden clasificarse en dos grandes categorías: obturadores con sectores metálicos situados en el objetivo —que no exceden del 1/500 de segundo— y obturadores de cortinilla, situada detrás o delante del objetivo, o inmediatamente delante de la superficie sensible.

Tiempo de exposición. — Es la duración necesaria para que la luz actúe eficazmente sobre la emulsión que recibe la imagen del sujeto. En la época de los daguerrotipos era muy larga, pero en la actualidad se ha reducido, gracias a las emulsiones ultrasensibles y a la abertura, cada vez mayor, de los objetivos, a 1/100 de segundo y, en ciertos casos, incluso a menos de 1/1 000 de segundo.

Este tiempo es sumamente variable, puesto que está en función de numerosos factores, en particular de la rapidez de la emulsión utilizada, de la abertura del diafragma, de la cantidad y la calidad de la iluminación, del color del sujeto, etc.

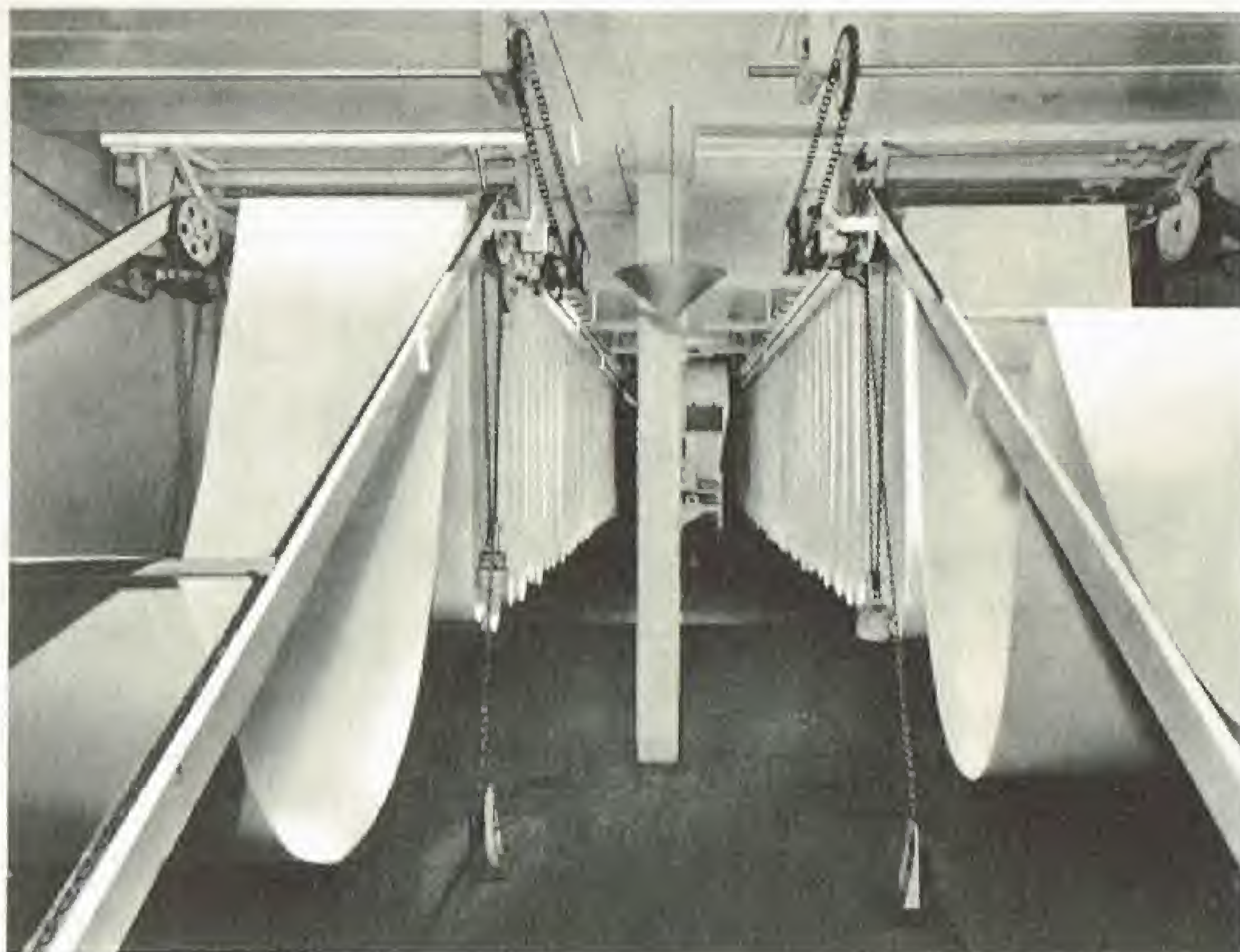
Para poder reducir los errores que no deja de llevar consigo la estimación "a simple vista" del tiempo de exposición, el operador dispone de diversos instrumentos: las *tablas de exposición* (poco precisas), los *fotómetros ópticos* y, sobre todo, las *células fotoeléctricas.*

Los fotómetros eléctricos constan de una célula, pequeña placa de metal cubierta con una capa de selenio; de un galvanómetro graduado cuya aguja se mueve al producir la luz en la célula una corriente eléctrica muy débil proporcional a la intensidad luminosa, y de un estuche con diferentes tablas que permiten determinar más o menos directamente el tiempo de exposición.

El negativo. — La placa o película sensible colocada en el aparato fotográfico recibe la imagen, llamada "latente", porque sólo aparece mediante un tratamiento —revelado— que consiste en su baño con un producto apropiado. La imagen obtenida es *negativa*, es decir, las luces del objeto fotografiado aparecen como zonas más o menos opacas, mientras que las sombras aparecen como zonas más o menos transparentes.

Las emulsiones que cubren el soporte de las superficies sensibles modernas —placas o películas— están todas compuestas de *gelatino bromuro*, mezcla íntima de gelatina, bromo y yoduro de potasio al que se añade una solución de nitrato de plata. Estas emulsiones sólo se vierten sobre el soporte después de haber sido aireadas y maduradas por un calentamiento apropiado que aumenta grandemente su sensibilidad.

Las primeras emulsiones fueron muy imperfectas, porque eran poco sensibles a las radiaciones verdes, amarillas y rojas, y muy sensibles, en cambio, a las radiaciones azules y ultravioleta.



Secadero de papel fotográfico sensibilizado (*Doc. Bauchet*)

La incorporación de diversos colorantes ha permitido equilibrar casi perfectamente la sensibilidad de las emulsiones modernas: eritrosina en las emulsiones ortocromáticas, particularmente sensibles a los verdes y amarillos, cianuro para las emulsiones llamadas pancromáticas, teóricamente sensibles a todos los colores, etc.

Cabe añadir que, a pesar de todo, se debe recurrir en ciertos casos, si se quiere obtener una equivalencia correcta de los valores, a filtros de vidrio o de gelatina coloreados, en particular verdes o amarillos.

Revelado de los clisés. — Se efectúa a una luz rigurosamente inactínica rojo obscuro, o en el caso de emulsiones pancromáticas, verde obscuro, o, todavía mejor, en una obscuridad absoluta.

El empleo de soluciones desensibilizadoras a base de colorantes —pinacriptol, etc.— permite revelar con luz amarilla o verde muy abundante, pero este procedimiento presenta pocas ventajas y muy graves peligros.

Se puede *controlar* el revelado, pero, con el constante aumento de la rapidez y de la sensibilidad cromática de las emulsiones, se prefiere cada vez más, por lo general, revelar "automáticamente" en una vasija cerrada, utilizando baños bastante adaptables, que permiten corregir en una elevada proporción los errores cometidos en lo que se refiere al tiempo de exposición.

El tiempo necesario para el revelado varía según numerosos factores, siendo los principales la emulsión utilizada, la fórmula y el grado de disolución del baño, su temperatura, etc.

También varía según la densidad y los contrastes que se deseen obtener. Debe señalarse que la densidad y, en cierta medida, los contrastes, crecen a medida que se aumenta la duración relativa del revelado, en igualdad de las restantes circunstancias.

Un revelado demasiado prolongado tiende a aumentar la granulación; debe evitarse, pues, si se trata de clisés de pequeño formato.

El revelador consta esencialmente de un reductor del revelador propiamente dicho, el cual, al combinarse con el oxígeno del agua, deja que el hidrógeno se apodere del bromo del bromuro para dar ácido bromhídrico y liberar la plata.

Los reductores empleados en la actualidad son casi únicamente el diamido fenol, el pirogallol, la glicina y sobre todo el *metol*, sea solo o en combinación con la *hidroquinona*.

Para evitar una oxidación demasiado rápida del reductor, se le añade una cierta cantidad de substancia *conservadora* (generalmente sulfito de sodio).

Por otra parte, la mayoría de los reductores tendrían una energía insuficiente si no se les añadiera una *substancia aceleradora* (un álcali, por lo general carbonato de sodio).

Por último, la aparición del velo químico se retrasa por medio de un *retardador*, como el bromuro de potasio o el benzotriazol.

Fijado. — Tiene por objeto eliminar el exceso de las sales de plata que aumentan la opacidad de la imagen y que, como son todavía sensibles a la luz, harían muy difícil la conservación del clisé.

El mejor solvente de las sales de plata es una solución concentrada de *hiposulfito de sodio* (al 25%) que se acidifica añadiéndole 25 cm³ por cada cien de bisulfito de sodio líquido.

Si se desea precaverse contra la posibilidad de una fusión de la gelatina, se añade al baño de fijado alún de cromo.

Los restos de hiposulfito se eliminan por medio de un lavado minucioso (media hora con agua corriente). Después de efectuado el lavado, se ponen a secar los negativos, corrigiéndolos mediante la acción de un *debilitador*, que disuelve la imagen, o de un *reforzador*, que aumenta las densidades; de esta forma se aumentan o se disminuyen los contrastes.

Los principales debilitadores son el ferrocianuro de potasio (prusiato rojo) y el persulfato de amoniaco, el permanganato o bicromato de potasio acidulado, etc. Como reforzador se emplea plata, o, todavía mejor, mercurio en forma de cloruro mercúrico o de yoduro.

Los pequeños defectos del modelo o del clisé pueden corregirse mediante retoques (trabajo al lápiz y al raspado).

Tiraje del positivo. — El tiraje del positivo sobre papel se hace por *contacto*, utilizando un chasis-prensa, o por *ampliación*, por medio de un ampliador, del que existen diferentes modelos. Los más corrientes son los ampliadores verticales, que permiten proyectar por transparencia, sobre una mesa, el clisé que hay que ampliar. El ampliador no sólo permite obtener una imagen más visible que la tomada con una distancia focal demasiado pequeña, sino también rehacer a voluntad el encuadre de la placa del negativo, frecuentemente defectuosa, escogiendo en el negativo la parte más interesante y realzándola por las partes inútiles. También permite suavizar la sequedad de un negativo demasiado detallado, hacer combinaciones difíciles de obtener con retoques, etc.

Son necesarios papeles bastante rápidos, al bromuro o al clorobromuro rápido. Los papeles al clorobromuro lento, al cloruro y, con mayor motivo, al citrato, no son convenientes.

Los papeles para los tirajes positivos son de diferentes clases:

De ennegrecimiento directo: citrato, autoviradores, que cada vez se emplean menos;

Papeles que necesitan revelado: papeles al bromuro de plata, al clorobromuro de plata y al cloruro de plata, lentos, cuyo tratamiento puede compararse con el de las emulsiones negativas.

Citemos finalmente los procedimientos llamados "artísticos": los papeles pigmentados al carbón, el oleotipo y el bromoil, que permiten a un operador diestro multitud de interpretaciones profesionales.

Fotografía de los colores

Reseña histórica. — Ya en 1810, **Seebeck** (1770-1831) observó en Jena que el cloruro de plata, preparado de cierta manera, reproducía vagamente los rayos de colores que lo impresionaban. **Becquerel** (1820-1891), perfeccionó empíricamente el procedimiento de Seebeck empleando el subcloruro formado directamente por electrólisis sobre una placa de plata, y obtuvo en 1848 las primeras imágenes fotográficas en colores dignas de atención. En 1861, Maxwell emitió su célebre teoría: "Todos los colores pueden reconstituirse combinando, en adecuadas proporciones, los tres colores fundamentales".

De esta teoría nació la *selección tricroma*, base común de todos los procedimientos de fotografía en colores actualmente utilizados.

Procedimiento Lippmann (1891). — Impresionando en la cámara obscura una emulsión pancromática de gelatino bromuro, cuyas partículas, insertas entre el vidrio de la placa y una masa de mercurio que forma espejo detrás de ellas, son lo suficientemente finas para que la capa sea absolutamente transparente. **Lippmann** (1845-1921) provocó la interferencia regular del rayo luminoso, que incide directamente sobre la gelatina a través del vidrio y del rayo propio reflejado por el espejo de mercurio.

Se obtiene así un sistema de ondas estacionarias que quedan registradas en la capa sensible y dan, una vez reveladas, delgadas láminas de plata reducida, muy brillantes, separadas por otras de gelatina; la longitud de cada onda estacionaria era la misma del color recibido. Por lo tanto, este color era fielmente restituido (visible en el clisé por transparencia). Así fue fijada por primera vez la onda con su longitud propia, y, por consiguiente, con su color.

Desgraciadamente, como la rapidez de una placa fotográfica está en razón directa del espesor de los granos de que está compuesta, la finura que exigía la emulsión requería un tiempo de exposición exagerado.

Principio de la tricromía. Procedimiento Ducos du Hauron. — El método tricromo es más práctico; su principio fue establecido simultáneamente, en 1869, por **Charles Cros** (1842-1888) y **Ducos du Hauron** (1837-1920), y se funda en la utilización de colores complementarios. Mezclando en proporciones convenientes tres luces coloreadas —azul violáceo, verde esmeralda y rojo rubí— o tres pigmentos —amarillo, rosa y azul-verde— pueden reproducirse la mayoría de los colores.

Supongamos que hemos conseguido obtener tres clisés monocromos de un mismo tema: un clisé que sólo contiene sus tintes rojos, otro que sólo contiene los tintes amarillos y un tercero que sólo refleja los azules.

Superpongamos estos tres clisés: vista por transparencia, la mezcla de los tres colores, variable en cada punto, restituirá el color propio de ese punto.

Duclos du Hauron utilizó el siguiente e ingenioso procedimiento: se traza sobre una placa de vidrio una trama formada de tres clases de trazos sumamente próximos y paralelos: un trazo rojo, un trazo amarillo y otro azul. Al aplicarlo contra la placa fotográfica expuesta en la cámara obscura, este entramado coloreado seleccionará los rayos coloreados procedentes del tema que se fotografía, línea por línea, en

cada región del clisé. Como el entramado policromo se supone que no puede discernirse a simple vista, cada elemento del clisé quedará dividido por este entramado, después de revelado, en una yuxtaposición de tres clases de líneas paralelas diferentemente matizadas, según que recorran unas las partes rojas, otras las partes amarillas y las terceras las partes azules de la imagen. Coloquemos nuevamente el negativo así obtenido sobre el entramado policromo que sirvió para su impresión, y reaparecerá, por transparencia, la distribución exacta de los colores en el mismo orden en que impresionaron la emulsión fotográfica primitiva.

Placas autocromas Lumière. — La fotografía en colores entró en el dominio práctico en 1904 con la placa autocroma de los hermanos Lumière, substituida después por las películas Lumicolor.

Esta placa, que era una aplicación de la *síntesis aditiva* de los colores, según la cual la adición de rayos luminosos azules, verdes y rojos da el blanco, consistía en una red tricroma formada de granos de fécula microscópicos coloreados y de una emulsión pancromática.

Como la selección de estos colores se hacía a través de esta red tricroma, la luz tiene primeramente que atravesar esta última, de donde resultaba una falta de rapidez muy sensible. El procedimiento se ha venido reemplazando cada vez más por otros que utilizan la *síntesis sustractiva* de los colores, en la cual los rayos luminosos atraviesan tres filtros coloreados antes de alcanzar la emulsión sensible (la mezcla de los tres colores primarios da en este caso el negro).

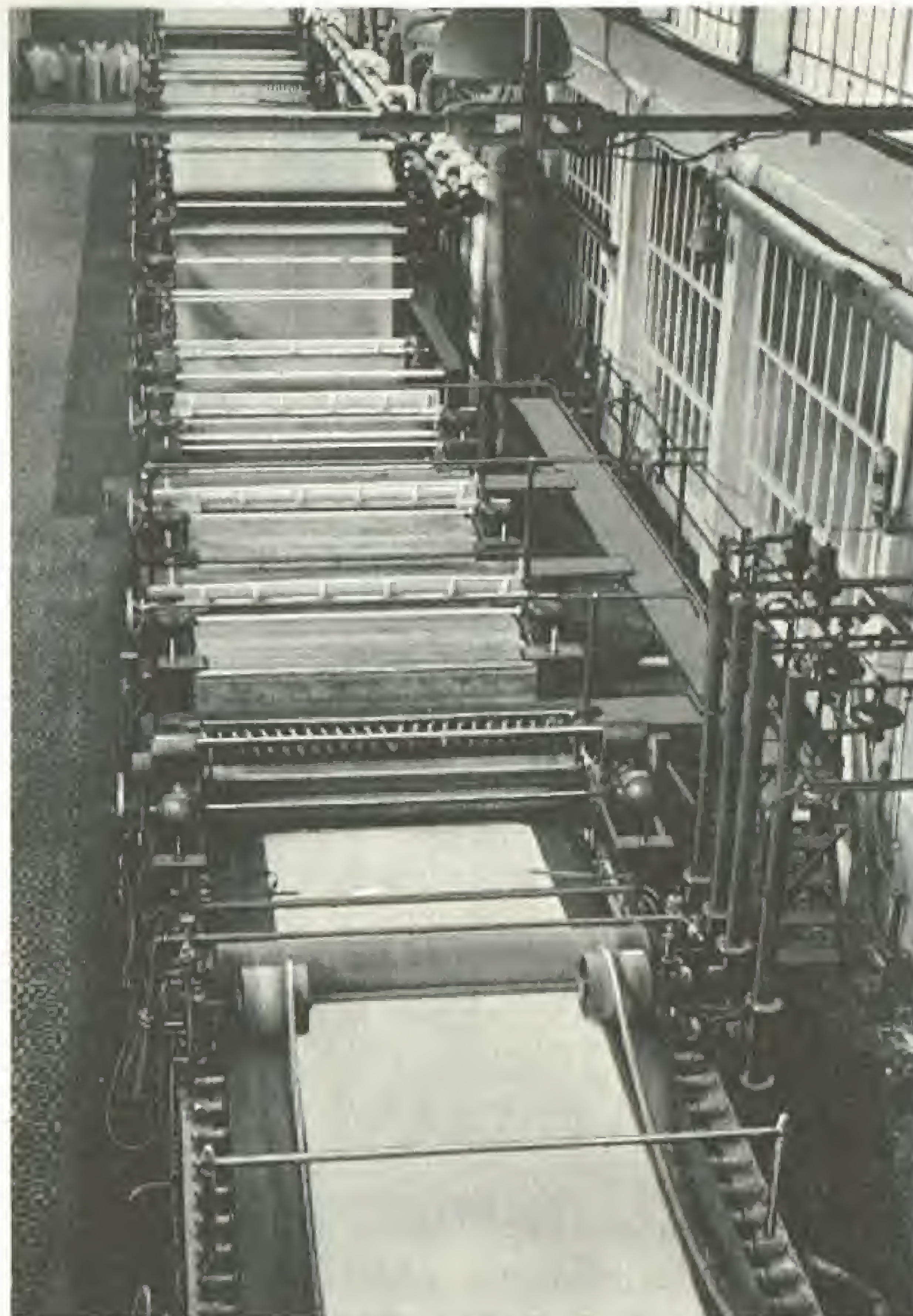
Partiendo de este procedimento es como se han realizado, con variantes, las películas más extendidas actualmente: Ektacromo, Agfacolor, Gevacolor, que son aplicaciones del mismo principio: superposición sobre un soporte único de tres emulsiones diferentes, sensible cada una de ellas a sólo uno de los tres colores fundamentales.

Tratamiento de las emulsiones en colores: es muy complejo y requiere siempre un primer revelado, en el que el clisé aparece en negro y, después, una exposición a la luz, antes de la cual, en la película Lumicolor, deberá blanquearse el clisé en un baño a base de bicromato y de potasio; por último, con un segundo revelado a plena luz, la imagen aparece en color con todos sus matices.

Algunas películas llevan ellas mismas las substancias generatrices de los colores y pueden ser tratadas por cualquier operador instruido. En otras películas, el Kodacrom en particular, los colorantes están en los baños, y el tratamiento es de tal complejidad que sólo puede efectuarse en los laboratorios del propio fabricante.

Tirajes en colores sobre papel: Últimamente han aparecido diversos procedimientos que permiten tirajes en colores directos sobre papel, partiendo de diapositivas en colores.

No puede negarse que este procedimiento se encuentra todavía en una fase experimental y que los resultados distan mucho de ser tan perfectos como los obtenidos en la diapositiva original.

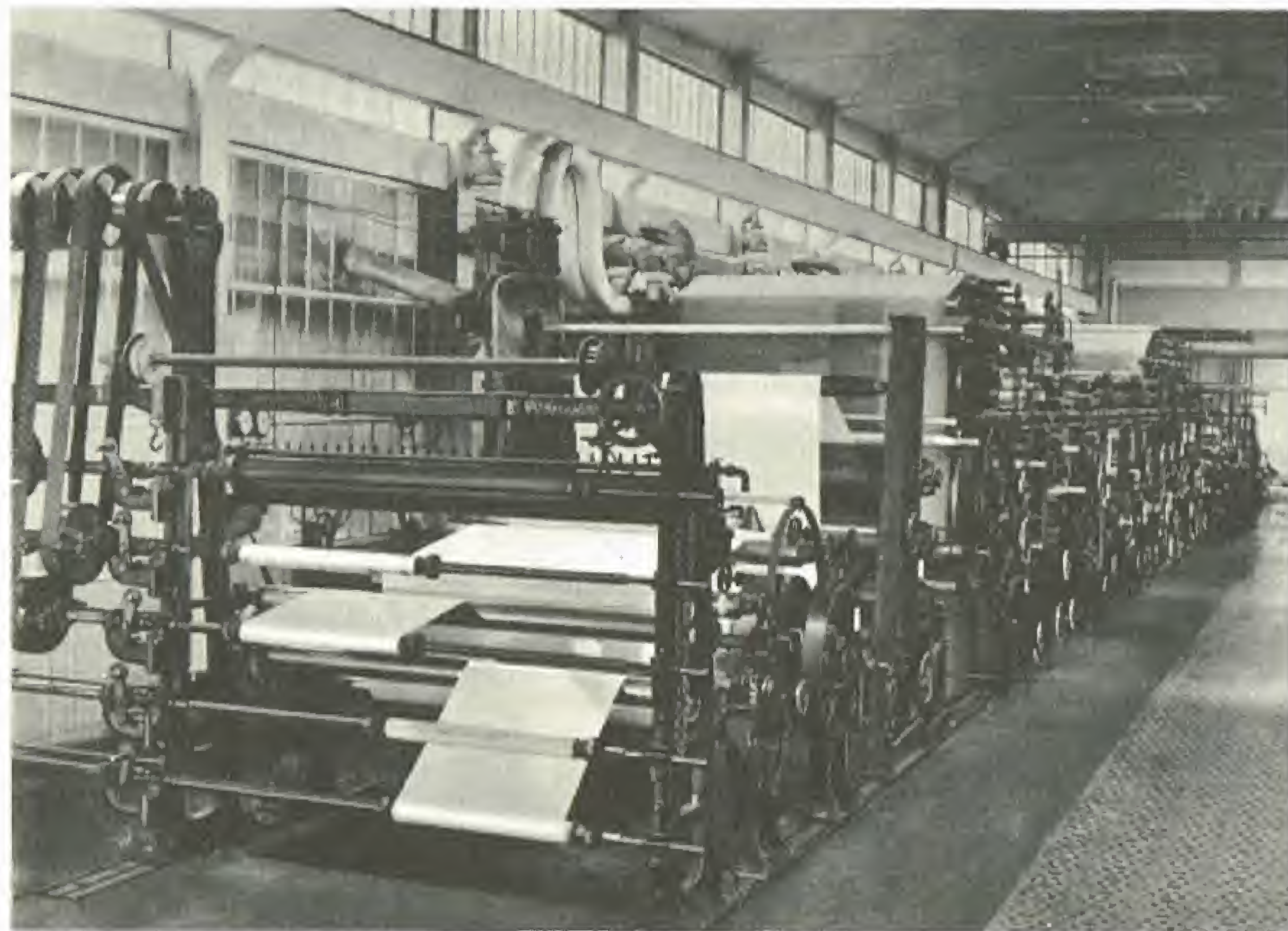


Arriba y abajo: Vistas de la máquina de fabricar papel fotográfico

Fotografía en relieve. — Las fotografías obtenidas con los anteriores procedimientos no reproducen rigurosamente lo que se observa al mirar el modelo, ya que falta la sensación llamada de *relieve*. La impresión visual del relieve depende de diversos factores fisiológicos y psicológicos, pero es principalmente debida a la visión binocular: cada ojo percibe una imagen diferente del objeto en relieve examinado. La superposición de ambas imágenes, y el esfuerzo necesario para que converjan en un mismo punto los ejes ópticos de los dos ojos, crean la sensación de relieve y permiten apreciar las distancias.

Para obtener fotografías que den esta impresión se toman dos fotografías simultáneas del tema con un aparato llamado estereoscópico, que está compuesto de dos cámaras asociadas; cada una tiene su objetivo, cuyos ejes ópticos, paralelos, están separados por la misma distancia que hay entre los dos ojos: se obtiene así el llamado estereograma. En el negativo, las imágenes son invertidas y contrarias, es decir, la imagen de la derecha se encuentra a la izquierda, e inversamente. La prueba positiva es examinada, una vez rectificada, en el *estereoscopio*, que funde las dos imágenes, previamente separadas.

También se obtiene la impresión de relieve con el procedimiento de los *anaglifos*: si se mira a través de un vidrio rojo un dibujo trazado en rojo más claro sobre fondo blanco (monocromo), no puede verse el dibujo; si se le observa con un vidrio verde, aparece en negro sobre fondo verde. Si se hace entonces corresponder al ojo izquierdo un monocromo verde y al derecho otro rojo, superponiendo ambas imágenes y observándolas con un anteojo cuyo cristal izquierdo sea rojo y el derecho verde, el ojo izquierdo sólo verá la perspectiva de la izquierda, y el derecho la perspectiva de la derecha, obteniéndose así la sensación de relieve. Se hacen también radiografías estereoscópicas.



Evolución de la fotografía. — Los aparatos que se utilizaban corrientemente hacia 1900 eran de placa y de formatos 13 × 18 o incluso 18 × 24.

El perfeccionamiento constante de los objetivos —abertura cada vez mayor, perfecta corrección de las aberraciones, etcétera—, la mayor perfección obtenida en la fabricación de las cámaras y, por último, la aparición de fórmulas de revelador de *grano fino*, que permitieron aumentos considerables de gran calidad, condujeron a la reducción de estos formatos: se han adoptado los formatos 9 × 12, 6 × 9 y, finalmente, los llamados "pequeños formatos", en particular el 24 × 36, cuyo clisé se obtiene sobre bandas de película cinematográfica standard de 35 milímetros.

Otra novedad importante de la fotografía es la tendencia a reemplazar cada vez con más frecuencia, la placa de vidrio por un soporte de celuloide en forma de película, e incluso a base de acetato de celulosa inflamable. Estas películas se facilitan ya cortadas en los diversos formatos fotográficos corrientes, o bien, gracias a la genial invención de G. Eastmann, en bobinas protegidas por un papel opaco que pueden cargarse o descargarse en plena luz.

Aplicaciones diversas de la fotografía. — Además de sus utilizaciones corrientes, documentales y artísticas, la fotografía tiene en nuestros días una multitud de aplicaciones científicas o médicas de las que nos limitaremos a citar las principales:

Radiografía (rayos X), fotografía por rayos ultravioleta, por infrarrojos (fotografía en la niebla, en la obscuridad o a enormes distancias, autentificación de textos o de cuadros antiguos, etc.); microfotografía, donde el objetivo es reemplazado por un microscopio;

Fotografía de las estrellas (fotografía estelar); levantamientos de terrenos; fotografía aérea;

Fotometría y espectrofotometría (estudio cuantitativo de los fenómenos en que intervienen las diversas radiaciones), etc.

Por último, una de las consecuencias más importantes de la fotografía ha sido el invento de la cinematografía.

Cinematografía

Reseña histórica. Aparatos tomavistas. Proyectores. La proyección cinematográfica. La película. Revelado de las películas. El cine en colores. El cine en relieve. — **El cine sonoro:** Cine sonoro con discos. Película sonora. Procedimiento de opacidad constante. Procedimiento de opacidad variable. Aplicaciones científicas del cinematógrafo

Reseña histórica. — La cinematografía ha sido posible gracias a una serie de investigaciones y de experiencias que, a veces, sólo han tenido una ligera relación con ella.

En el siglo XVII, el abate **Nollet** (1700-1770) observó la persistencia de las imágenes luminosas en la retina, principio de todos los aparatos destinados a reconstituir el movimiento por medio de imágenes gráficas.

Cuando la retina es excitada por la luz, la impresión que experimentamos no desaparece al cesar la causa que la origina; nuestra percepción, una vez suprimida totalmente la luz, persiste todavía durante 1/10 de segundo, por lo que puede suprimirse una imagen que estamos observando y reemplazarse por otra sin que el ojo se dé cuenta de ello, siempre que esta sustitución se efectúe con cierta rapidez. Actuando de esta forma con las imágenes sucesivas de una serie que muestra las diferentes fases del movimiento de un tema, se ve cómo este tema se mueve.

Después del abate Nollet, el profesor belga **Joseph Plateau** (1801-1883) construyó en 1832 el *fenaquistiscopio.*

Este apartado estaba compuesto de dos discos de cartón que podían girar solidariamente alrededor de un mismo eje; uno de los discos llevaba alrededor, en su borde, una docena de imágenes impresas que representaban las diferentes actitudes de un corredor o de un saltador. En el margen del otro disco se habían recortado estrechas ventanas radiales; mirando a través de una de las ventanas, y haciendo que el conjunto girara rápidamente, se veía, en el momento del paso de cada rendija, la imagen de enfrente. La visión de cada imagen sólo duraba un breve instante y, por consecuencia, parecía fija. Ello originaba la ilusión de que el sujeto estaba en movimiento.

Plateau precisó ciertas leyes de óptica sin las cuales no habría podido existir la cinematografía; por la misma época, el profesor vienés **Stampfer** construyó el *estroboscopio.*

La primera proyección de un dibujo animado se llevó a cabo en 1845. **Uchatius** (1811-1881) consiguió proyectar sobre una pantalla, con una linterna mágica, imágenes transparentes dispuestas sobre un disco que giraba en el foco del objetivo; otro disco, con rendijas y girando alrededor del mismo eje que el primero, producía los eclipses indispensables para la observación del fenómeno.

Citemos el *zootropio* (1832) de **Horner,** que es un perfeccionamiento del fenaquistiscopio que permitía a varias personas observar simultáneamente las imágenes; el *mutoscopio* (1866), el *praxinoscopio* de **Reynaud** (1803-1880), descubierto en 1877, especie de zootropio, en el que las imágenes se observaban gracias a su reflexión sobre una serie de pequeños espejos agrupados en el centro del tambor.

El primer aparato que permitió realizar la síntesis del movimiento por medio de imágenes fotográficas fue el *fonoscopio* de **Demeny** (1891).

El **cinetoscopio** de **Edison** permitió, en 1892, la síntesis del movimiento utilizando largas series de imágenes fotográficas, escalonadas a lo largo de una película de celuloide, cerrada sobre ella misma de manera que formaba una banda sinfín. La película se observaba a través de una lente y las imágenes se iluminaban por transparencia con una pequeña lámpara eléctrica cuya luz era interrumpida periódicamente por un disco giratorio. Durante la duración de cada eclipse se reemplazaba cada fotografía por la siguiente.

La observación era perfecta, pero sólo podía efectuarla un sólo espectador. La proyección sobre una pantalla no era posible a causa de la falta de luminosidad de las imágenes, ya que, como el movimiento de la película era continuo, se hacía necesario iluminarla muy brevemente, a fin de que las imágenes, que sólo se percibían durante un tiempo muy corto, parecieran fijas y fueran, por lo tanto, netas.

También se consideró de absoluta necesidad, tanto para obtener una proyección sobre una pantalla como para tomar imágenes, parar la película en el momento de descubrir cada imagen. **Marey** fue el primero que reconoció esta necesidad, que constituye la base del cinematógrafo. El proyector cronofotográfico que construyó en 1893 no es más que la aplicación directa de este principio. Desgraciadamente, no pudo conseguirse la fijeza de las imágenes, porque Marey no quiso nunca utilizar película perforada.

En 1895, **Louis Lumière** (1864-1948) y su hermano **Auguste** (1862-1954) concibieron el cinematógrafo propiamente dicho. Su aparato servía inicialmente para la toma de vistas y su proyección sobre una pantalla; hoy día, las dos operaciones son distintas y el cinematógrafo utiliza un aparato tomavistas —aparato negativo— que analiza el mo-



Escena cumbre de la película tan famosa de S. M. Eisenstein, Iván el Terrible (2.º episodio)

vimiento, y un aparato de proyección —aparato positivo— que da la síntesis de dicho movimiento.

Definición. *La* **cinematografía** *es el conjunto de métodos y procedimientos necesarios para conseguir la fotografía y la reproducción en imágenes del movimiento.*

Aparatos tomavistas. — Por el foco de un objetivo se hace que desfile, con un movimiento intermitente, una película sensibilizada cuyas paradas están sincronizadas con la abertura de un obturador. La perforación de las bandas permite el espaciamiento regular de las imágenes y la fijeza de las proyecciones.

Se ha adoptado una pequeña dimensión de las imágenes a fin de poder utilizar bandas de película de solamente 35 mm de anchura (5 mm están ocupados, a cada lado, por la perforación).

La experiencia ha mostrado que era necesario proyectar 16 imágenes por segundo y, por lo tanto, tomar también 16 imágenes por segundo, como mínimo. La película debe, pues, detenerse y volver a ponerse en movimiento 16 veces por segundo; de aquí la complicación del mecanismo.

Los tomavistas están provistos de estuches depósitos, que se adaptan a la parte superior del aparato, conteniendo 120 metros de película, una vez impresionada ésta, se recoge en una caja receptora. Cuando se ha agotado toda la película de la caja depósito, se sustituyen ambas cajas por otras dos, y las operaciones pueden continuar sin interrupción. Los positivos obtenidos se empalman con los negativos de los tomavistas, unos a continuación de otros, obteniéndose así películas dispuestas para ser proyectadas y de una longitud ilimitada.

El objetivo que se utilice en el tomavistas debe tener siempre una gran abertura, a fin de que pueda operarse en todas las condiciones posibles de iluminación.

Los diversos aparatos cinematográficos se diferencian en el mecanismo que emplean para mover la película y conferirle un movimiento intermitente, aunque todos ellos llevan una parte común (*fig.* 658); la película es siempre extraída de su caja depósito por un cilindro dentado, pasando después por un pasillo K provisto de una ventana F en la que se hace la impresión fotográfica; después es recogida por otro cilindro dentado y penetra en su caja receptora, en la cual un eje de fricción la arrolla de nuevo. Estos órganos giran con movimiento uniforme, y si la película obedeciera sólo a ellos, el movimiento sería continuo.

El mecanismo, variable según los diversos sistemas, es el que comunica a la película un movimiento intermitente: este movimiento sólo afecta a la parte de la película comprendida entre la salida del pasillo y el segundo cilindro. Se conocen varios mecanismos de arrastre: el Lumière, el Demeny y el Germain Sanson, entre otros.

F
K
E

Fig. 658

En el mecanismo Demeny, uno de los más extendidos, una leva situada entre la ventanilla F y el cilindro inferior añade, durante una parte de su rotación, su efecto al del cilindro inferior, extrayendo del pasillo K una porción de película mayor que la que podría extraer el cilindro sólo. Durante la parte restante de su rotación, la leva retrocede y deja de actuar, obligando a que el cilindro inferior, antes de poder extraer más película, absorba el pequeño excedente que se ha acumulado bajo la ventanilla por la acción de la leva. Mientras dura esta operación, la parte de película que está frente a la ventanilla permanece inmóvil y recibe la impresión fotográfica.

Los tomavistas llevan un trípode muy rígido, y una plataforma móvil que permite orientarlos en todos los sentidos. También llevan un visor, un nivel de agua, un contador de metros de película y una torrecilla con una serie de objetivos de diferentes longitudes focales que permiten fotografiar desde un mismo punto una escena con escalas diferentes.

Proyectores. — Para que las proyecciones sean lo más luminosas posible, es necesario que la imagen permanezca visible, es decir, que el objetivo esté al descubierto durante el mayor tiempo posible; por consiguiente, es conveniente reducir al mínimo estricto el tiempo de escamoteo de la película.

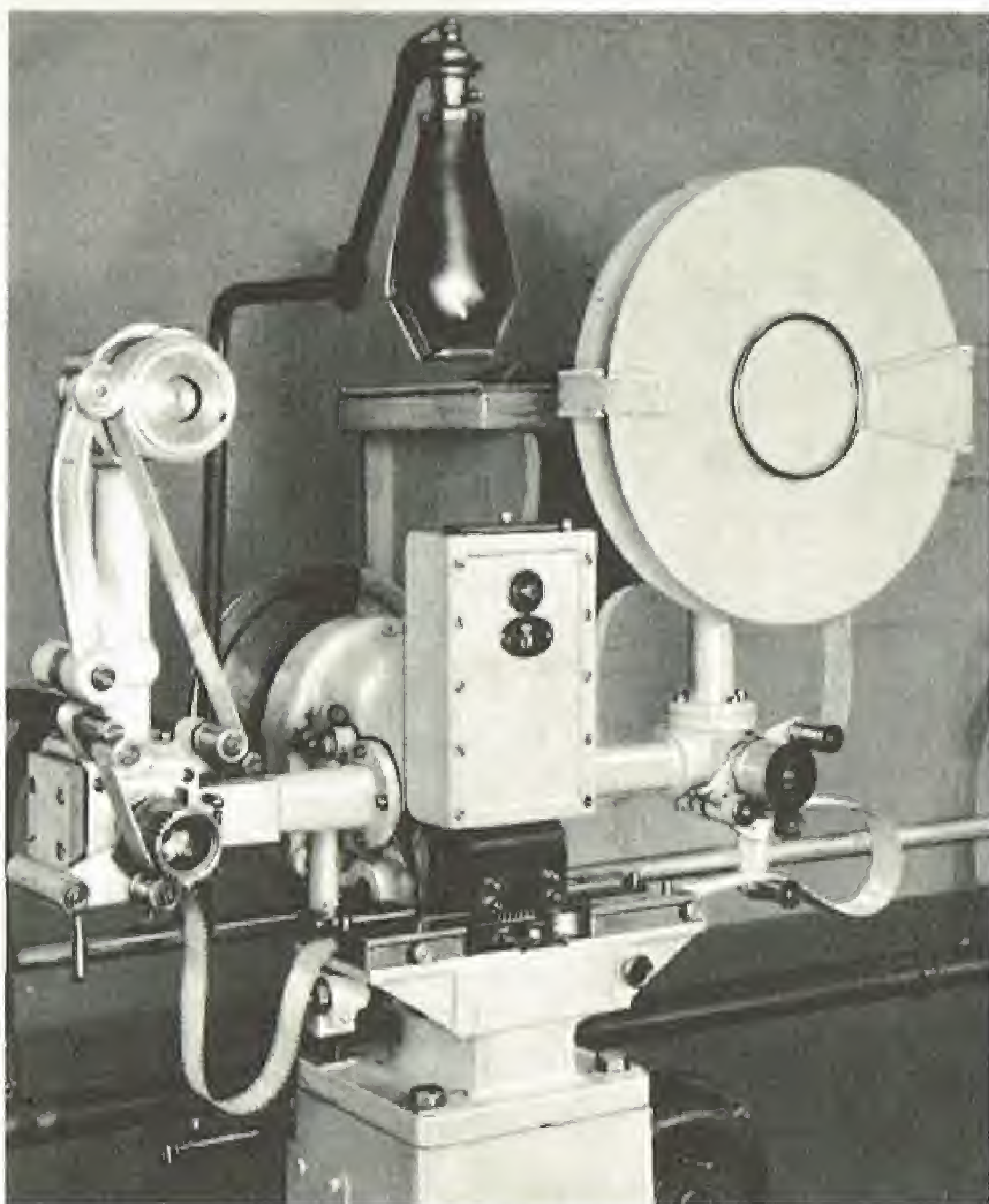
El procedimiento Germain Sanson, llamado de "Cruz de Malta", se adapta muy especialmente a esta finalidad (1896).

La proyección cinematográfica. — La fuente luminosa tiene que ser muy intensa, ya que el disco obturador retiene la mitad de la luz. El arco eléctrico se va sustituyendo, cada vez más, por lámparas de incandescencia.

Se toman grandes precauciones para evitar que se incendie la película de celuloide. En la trayectoria de los rayos, a la salida de la linterna, se coloca una cuba de agua que absorbe los rayos infrarrojos. En caso de detención de la película, el operador abate una persiana móvil sobre el haz de iluminación, etc.

La película. — Está compuesta de un soporte transparente de celuloide cubierto con una emulsión fotográfica cuyo espesor es, aproximadamente, 0,14 mm.

El celuloide se prepara disolviendo algodón pólvora en una mezcla de alcohol y éter a la que se añade un poco de alcanfor y de aceite de ricino. El líquido así obtenido, bastante denso, se extiende después, vertiéndolo por una rendija estrecha, sobre una larga banda sinfín de metal pulimentado, que se desplaza horizontalmente como una correa de transmisión; la capa de celuloide se solidifica, secándose rápidamente a causa de la evaporación del alcohol y el éter. Una vez solidificada, se la despega del soporte y se la arrolla en una bobina, cubriéndola a continuación con la emulsión sensible; como está preparada sobre una anchura de aproximadamente 40 cm, se la recorta en bandas de 35 mm de ancho.



Máquina para perforar la película cinematográfica de 35 mm (*Doc. Bauchet*)

Desgraciadamente el celuloide es muy inflamable.

Las películas cinematográficas se preparan, como las placas fotográficas ordinarias, con emulsiones rápidas o lentas según el uso a que se destinen: para las tomas de vistas, emulsión negativa extrarrápida; para los positivos de proyección a partir de los negativos, se utiliza una emulsión más lenta. La película debe ser con frecuencia de acetocelulosa, a causa del riesgo de incendio.

El tamaño de las imágenes, la anchura de la película y la perforación están fijados rigurosa e internacionalmente.

Las imágenes tienen 18 mm de altura y 24 de anchura, estando cada una de ellas separada de la siguiente por 1 mm. La película debe tener 35 mm de anchura, y llevar en cada borde un margen de 5,5 mm reservado a las perforaciones; hay cuatro a cada lado, por imagen, espaciadas regularmente.

Revelado de las películas. — El revelado de las películas no presenta dificultades extraordinarias y se efectúa por trozos de 50 metros, en los cuales hay orificios de referencia para el fotógrafo.

Para el revelado se utiliza un bastidor liso de madera, de un metro cuadrado de superficie, sobre el cual se arrolla el film impresionado.

Antes de ser secadas, las películas se bañan en una solución de glicerina, para que adquieran una cierta flexibilidad.

El secado se lleva a cabo arrollando la película en un tambor movido por un motor eléctrico y que está sometido a una corriente de aire.

Para obtener el positivo, se pone en contacto el negativo con una película virgen; pasan por un aparato especial, y la impresión se hace en el momento en que ambas películas reciben la luz a través de una ventanilla iluminada por una lámpara de incandescencia.

Algunas veces, se transforma directamente el negativo en positivo. Después de revelado, se lava el negativo y, sin fijarlo, se le sumerge en un baño de permanganato de potasio ácido; este baño disuelve toda la plata reducida del clisé, dejando intactas las partes bromuradas no impresionadas por la luz.

Se expone después el clisé a la luz, impresionándose así las partes bromuradas; se hace un segundo revelado en plena luz, y se lava.

El cine en colores. — (V. Fotografía de los colores, pág. 227.) La autocromía Lumière no se aplica al cine, a causa del largo tiempo de exposición que requiere. Se han estudiado numerosos sistemas, algunos de ellos fundados en el principio de Ducos du Hauron, que consiste en hacer alternar sobre la banda tres clisés coloreados complementariamente (tricromía Gaumont).

El cine en relieve. — Se aplica el procedimiento estereoscópico, que consiste en presentar al observador, sucesivamente, las imágenes derechas e izquierdas, disponiendo éste de un obturador doble que deja al

descubierto, alternativamente, el ojo derecho y el ojo izquierdo con la misma frecuencia que los cambios de imagen sobre la pantalla, pero este procedimiento es demasiado complicado.

También se utiliza el procedimiento de los anaglifos: la imagen derecha se proyecta con luz roja y la izquierda con luz verde, y se contemplan con unas gafas, uno de cuyos cristales, el derecho, es rojo, y el otro, el izquierdo, verde.

El cine sonoro

La reproducción de los movimientos en la pantalla y la de los ruidos, palabras o canciones en la sala pueden combinarse de dos formas: registrando éstos sobre un disco de fonógrafo que los reproduce en la forma ordinaria, o fijándolos sobre una película especial que los reproduce al pasar ante una fuente luminosa sincrónicamente con la película cinematográfica.

Cine sonoro con discos. — Este sistema fue estudiado por **León Gaumont.** En 1902 presentó a la Sociedad Francesa de Fotografía una película hablada, la cual, mediante un disco de gramófono, reproducía las palabras, mientras el personaje parecía hablar en la pantalla.

El 27 de diciembre de 1910, Gaumont hizo una demostración ante la Academia de Ciencias de Francia *(fonosceno).*

El registro se hacía simultáneamente sobre la película negativa, en lo concerniente a las imágenes, y sobre el disco virgen, en lo relativo a los sonidos, desplazándose la película y el disco con movimientos rigurosamente concertados. Un micrófono recibía las ondas sonoras y las transmitía a un receptor telefónico provisto de un estilete, que se inscribía sobre el disco fonográfico. La transmisión debilitaba mucho los sonidos; por consiguiente, la reproducción era mala. Para obtener una reproducción sonora suficientemente intensa en las grandes salas, Gaumont utilizaba un amplificador de aire comprimido. Tanto el fonógrafo como el cinematógrafo eran accionados por pequeños motores eléctricos síncronos *(cronófono).*

En 1918, la Sociedad Gaumont hizo patentar un sistema de lectura perfeccionada de discos de fonógrafo por un pick-up electromagnético. El empleo de este lector con amplificación, que accionaba altavoces situados detrás de la pantalla de proyección, simplificaba el cronófono: un solo motor movía, utilizando las dos extremidades de su eje, el disco y el cinematógrafo.

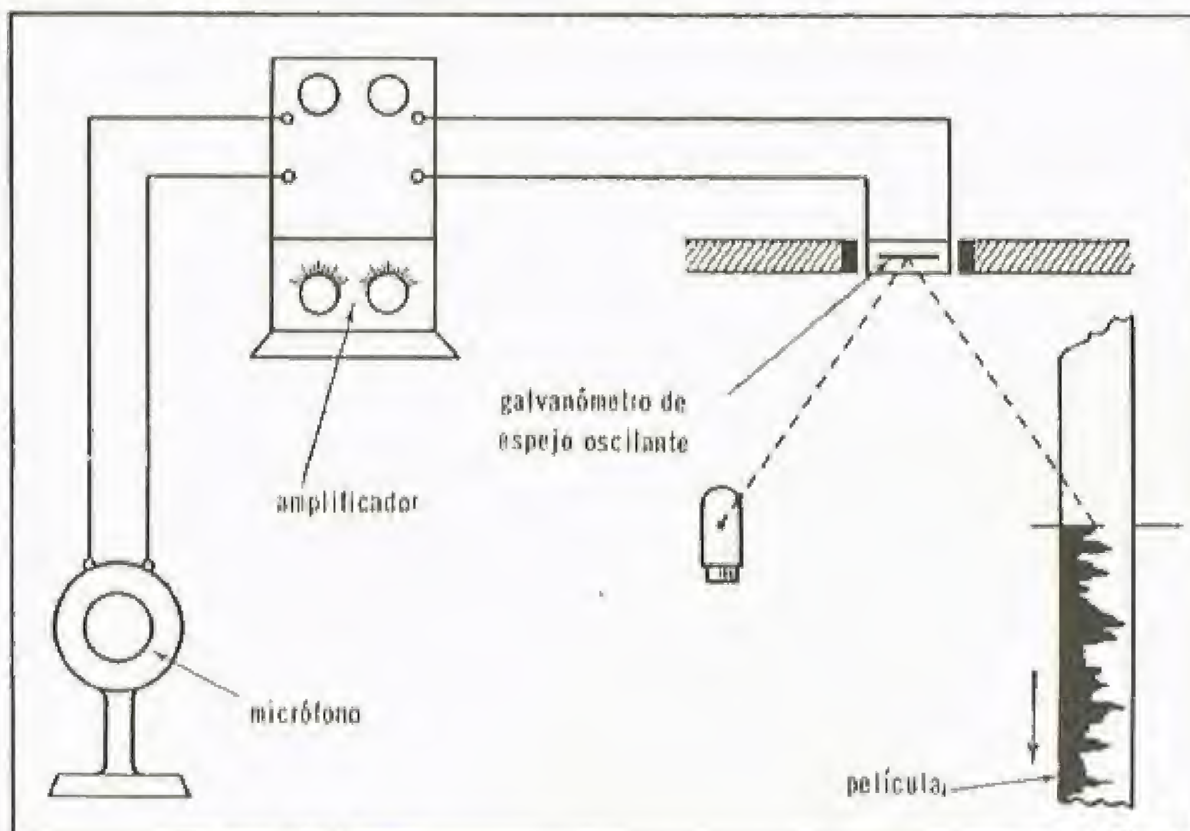


Fig. 659.—Registro de opacidad constante

Película sonora. — Los procedimientos de registro de las películas sonoras tienen como objeto obtener sobre uno de sus bordes una banda modulada que, en el momento de la proyección de la película, será intercalada entre una fuente luminosa y una célula fotoeléctrica. Esta banda constituye, con respecto al haz luminoso procedente de la fuente, una pantalla cuya acción varía en función de la frecuencia y de la intensidad de los sonidos que hay que reproducir; la iluminación de la célula, y, por consiguiente, la intensidad de la corriente en el circuito eléctrico que atraviesa el altavoz, que está determinada por esta célula y es la que al final de la operación restituye el sonido, varían de manera correspondiente.

Se distinguen dos procedimientos: de intensidad u opacidad constante y de opacidad variable y superficie constante.

Procedimiento de opacidad constante. — La banda modulada está constituida por una zona transparente y otra no transparente de opacidad constante, separadas por un perfil serrado.

Se utilizan uno o varios micrófonos muy sensibles, y la corriente que los atraviesa, modulada por las vibraciones sonoras que llegan a la membrana, es enviada a un amplificador análogo a los de la T. S. H.; esta corriente así amplificada pasa por un galvanómetro bifilar de espejo, de algunos milímetros de lado. El espejo recibe la imagen de una fuente luminosa y la refleja sobre un objetivo cilíndrico que la transforma en un haz muy delgado que se desplaza delante de la película entre las perforaciones, o sea sobre una anchura de 25 mm. Esta película pasa por un pasillo obscuro en forma continua y absolutamente regular. El espesor del trozo que se inscribe en la película tiene sólo unas centésimas de milímetro.

Para reproducir los sonidos, se hace pasar la película sonora por un pasillo con una rendija horizontal. A un lado de este pasillo se coloca una fuerte lámpara de incandescencia; un condensador cilíndrico distribuye esta iluminación por toda la longitud de la ventanilla, en forma de delgada línea luminosa.

Al otro lado, un objetivo recoge de nuevo la imagen de esta ventanilla y la proyecta, amplificada sobre una célula fotoeléctrica especial de muy poca anchura. Si la película sonora pasa por el pasillo del aparato

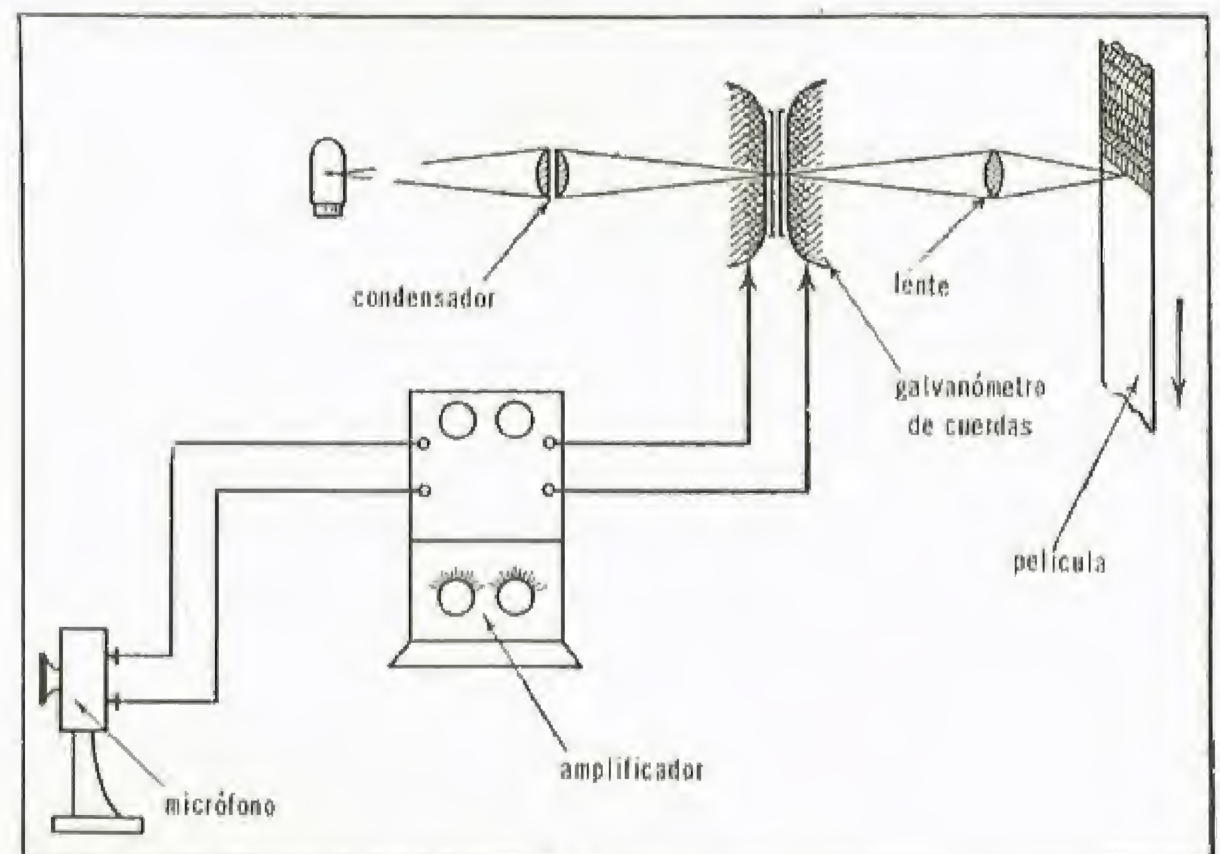


Fig. 660.—Registro de opacidad variable y superficie constante

de proyección sincronizada con la película cinematográfica, y a la misma velocidad que en el momento del registro, el paso de los miles de trazos registrados por segundo sobre la película provocará las mismas interrupciones y debilitaciones de intensidad de la luz que llega a la célula fotoeléctrica, y producirán las correspondientes variaciones en la intensidad de la corriente, que atraviesa a la vez la célula y el circuito del amplificador al cual está conectado el altavoz.

Los sonidos serán entonces reproducidos con una extraordinaria precisión *(fig.* 659).

Procedimiento de opacidad variable. — Sobre la banda sonora se obtiene una sucesión de rayas, de muy poca anchura, cuya opacidad varía con la frecuencia y la amplitud de los sonidos *(fig.* 660).

En el procedimiento Tobis, la fuente luminosa se dispone de forma que dé un rayo que varíe en función de la frecuencia y la amplitud de los sonidos. Es una lámpara de descarga catódica, que lleva una ampolla llena de neón o de argón, a la presión de 25 mm de mercurio, en la que se han montado dos electrodos: un cátodo de cobre de forma especial, y un ánodo de platino. Si se aplica a esta lámpara cierto potencial entre sus electrodos, se producirá una descarga incandescente que se formará principalmente en el interior del cátodo. La luminosidad del ánodo es prácticamente nula. La intensidad luminosa emitida por el cátodo es proporcional a la corriente que atraviesa la lámpara.

Intercalando esta lámpara en el circuito de salida de un amplificador modulado por la corriente microfónica, se obtiene una intensidad luminosa que varía en función de la frecuencia y la amplitud de los sonidos (de 1 a 10).

En el procedimiento Kerr-Karolus *(fig.* 661), se utiliza el *efecto Kerr:* cuando se someten a la acción de un campo electrostático ciertos medios isótropos, como el nitrobenzeno o el metatrinitrotolueno, transforman un haz polarizado linealmente en otro haz polarizado elípticamente, siendo esta transformación función de la intensidad del campo electrostático.

El dispositivo empleado se compone de una fuente luminosa, un condensador, un órgano modulador y un dispositivo óptico capaz de

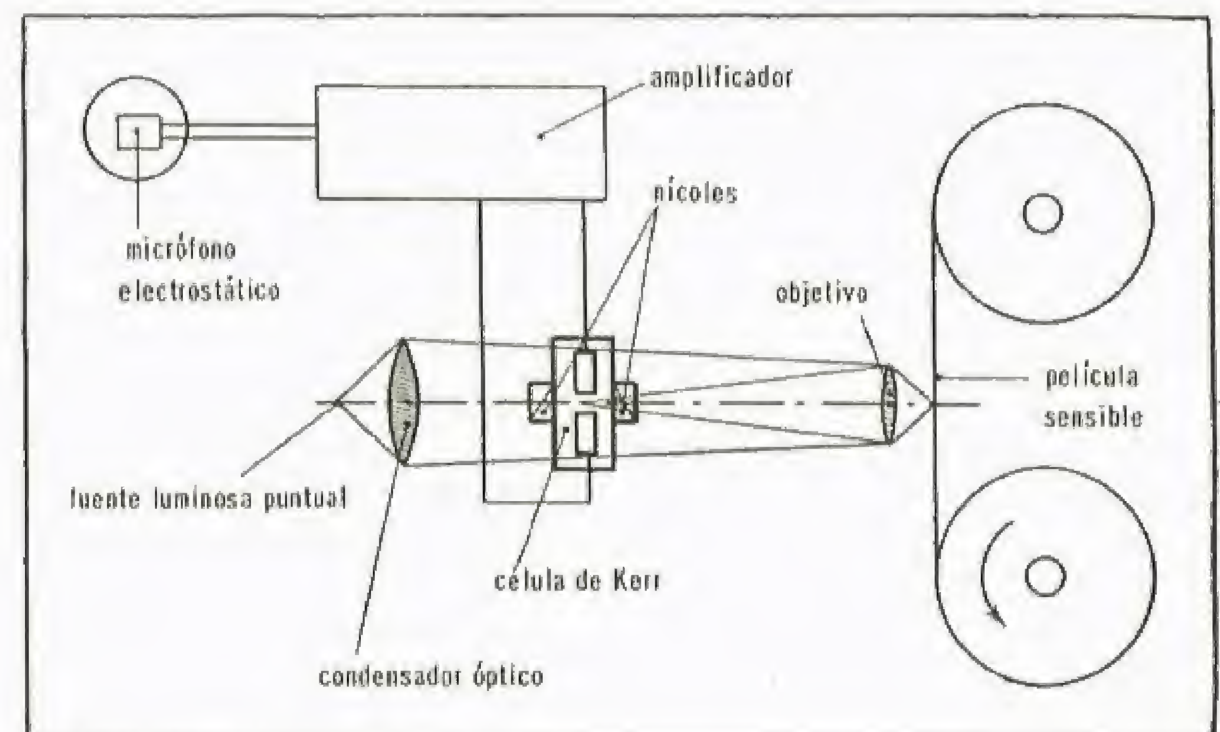


Fig. 661.—Principio del dispositivo de registro Kerr-Karolus

proyectar rayas muy finas sobre la película. La rendija va en el órgano modulador.

Este órgano se compone de dos *nícoles,* entre los cuales se interpone la célula de Kerr. Estos dos nícoles tienen sus planos de polarización respectivos mutuamente perpendiculares. Por su parte, la célula está constituida por un recipiente de vidrio lleno de nitrobenceno, en el que dos placas dejan cierto espacio, que es la rendija.



Fotografía de «trabajo» tomada durante el rodaje de una película (*Doc. Thonnart Cinema*)

Cuando no existe ninguna diferencia de potencial entre las placas, la luz no pasa; desde el momento en que se crea un campo electrostático, el conjunto deja pasar un haz cuya intensidad es función de dicho campo. Para el registro, se intercalan las placas en el circuito de salida de un amplificador de corriente microfónica.

Este sistema no puede desajustarse y no da lugar a ninguna distorsión.

Aplicaciones científicas del cinematógrafo. — La distracción no es la única finalidad del cine, ya que constituye un potente medio de investigación de todas las formas del movimiento: permite incluso el estudio de los movimientos muy rápidos, como el paso de un proyectil, el batimiento de las alas de un insecto, etc.

Han llegado a realizarse varias decenas de millares de fotografías por segundo. A estas elevadas frecuencias, las fotografías deben tomarse sobre una película que se desplace rápidamente y de manera continua, lo que se consigue compensando el movimiento de la película con un desplazamiento óptico de la imagen, en el momento de su toma, en el mismo sentido y a la misma velocidad que la película —oscilación de un espejo, desplazamiento del objetivo—, o bien iluminando el campo fotográfico con relámpagos sumamente breves: de una millonésima de segundo.

Otras veces, la película permanece inmóvil y las imágenes se desplazan sobre su superficie por medio de un prisma giratorio. Así se llegan a tomar series de 150 imágenes, a razón de 25 000 por segundo, e incluso de 100 000.

Registro del sonido

Reseña histórica. Fonógrafo de discos. Discos microsurcos. Registro sobre película fotográfica. Registro magnético

Reseña histórica. — El fonógrafo o aparato de reproducción de sonidos —palabra humana, canto y música— fue inventado por **Edison** en 1878, y perfeccionado por **Graham Bell.** En el primer modelo, el intérprete actuaba o cantaba ante un amplificador en forma de trompeta, en cuyo final había un diafragma que desplazaba, al vibrar, un estilete. Este estilete grababa sobre estaño los movimientos del diafragma; inversamente, al apoyar una aguja contra esta hoja de estaño se imprimía al diafragma el mismo movimiento que se había inscrito antes, lo que restituía el sonido registrado.



Fonógrafo Pathé-Marconi de cilindro (*Fot. Larousse*)

Este modelo primitivo ha sido objeto de numerosos perfeccionamientos. El cilindro se sustituyó por el disco y el estaño por la cera. Se han ideado también otros procedimientos que utilizan la película fotográfica, o bien hilos o bandas magnéticas.

Fonógrafo de discos. — El registro o grabación mecánica ha desaparecido completamente, dejando paso a la grabación eléctrica.

Los sonidos que hay que registrar son recogidos por micrófonos, amplificándose las débiles variaciones de la corriente microfónica con amplificadores de lámparas tríodo, como en la telefonía sin hilos. La corriente amplificadora actúa sobre un grabador electromagnético *(pick-up)* sobre el que produce las vibraciones que moverán el estilete que traza el surco.

La reproducción se obtiene invirtiendo el fenómeno. Los movimientos del estilete producen corrientes eléctricas que, una vez amplificadas, actúan sobre un altavoz.

El disco de cera que se ha grabado se reproduce por galvanoplastia; del segundo disco se obtiene otro metálico en relieve que sirve de matriz para imprimir, por presión sobre una substancia plástica, una copia del disco primitivo.

En los primeros discos la grabación se hacía en profundidad, es decir, en el sentido del espesor del disco. Actualmente, los surcos son siempre transversales, es decir, en el sentido de la superficie.

Discos microsurcos. — Uno de los grandes inconvenientes del fonógrafo de discos es la corta duración de la audición que permite cada lado del disco, la cual no excede de tres minutos. Esto es muy molesto en los casos de obras sinfónicas importantes, cuya audición hay que interrumpir cada tres minutos para cambiar el disco. Se subsana este defecto actualmente utilizando discos microsurcos, es decir, cuyos surcos son

mucho más pequeños que los de los discos ordinarios. Al mismo tiempo se ha reducido la velocidad de rotación de 78 revoluciones por minuto a 33. La audición de estos discos dura 20 minutos y su fabricación ha sido posible gracias al empleo de una materia plástica especial: el cloruro de polivinilo.

Registro sobre película fotográfica. — La técnica es exactamente la misma que la del cine sonoro. Con este sistema se obtienen, evidentemente, extraordinarias duraciones de audición.

Registro magnético. — Su principio es el siguiente: las corrientes microfónicas son enviadas, después de amplificadas, a la bobina de un electroimán (*fig.* 662), ante el cual se desplaza a velocidad constante un hilo o banda magnética. El campo magnético variable producido por el electroimán provoca en el hilo una imantación remanente de magnitud variable que reproduce las variaciones de la corriente microfónica. Finalizado el registro, basta, para obtener la reproducción, con hacer girar el hilo magnético en sentido inverso. Su imantación remanente inducirá en la bobina del electroimán corrientes variables que, una vez amplificadas, se enviarán a un altavoz.

Una de las ventajas de este procedimiento es poder borrar el registro o grabación efectuada: para ello basta con que el hilo gire ante un electroimán lo suficientemente potente para provocar la saturación magnética. De esta forma, un mismo hilo puede servir para un número indefinido de registros sucesivos. Los hilos son de acero inoxidable 18-8, y las bandas de papel o de materia plástica salpicada con óxido magnético de hierro (espesor 1/100 mm) que se mantiene fijo gracias a una substancia adhesiva. La grabación magnética es muy utilizada en los dictáfonos, principalmente para los reportajes diferidos de la radiodifusión, pudiendo también servir para la reproducción de obras musicales.

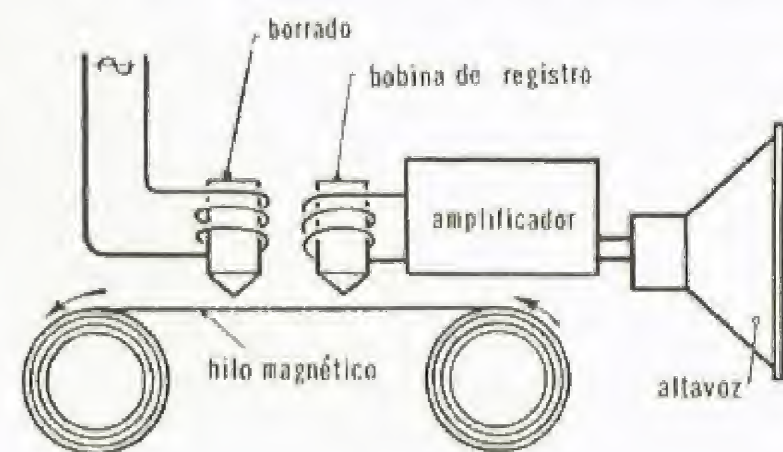


Fig. 662

Detección a distancia

Ultrasonidos: Producción. Detección por ultrasonidos. — **Radar:** Descripción. **Infrarrojos:** Detección por rayos infrarrojos

La detección a distancia consiste en localizar objetos cuando su percepción visual ya no es posible. Así sucede, por ejemplo, durante la noche, en el agua o cuando la visibilidad es escasa a causa de los diversos fenómenos atmosféricos. Para ello se recurre a la reflexión o difusión de las ondas por los objetos que se han de localizar. Estas ondas pueden ser sonoras (ultrasonidos), luminosas no perceptibles visualmente (infrarrojas) u electromagnéticas (radar). Algunas de estas detecciones llegan a ser de tal precisión que se utilizan incluso cuando los objetos que hay que detectar son perfectamente visibles.

Ultrasonidos

Se llaman *ultrasonidos* las vibraciones del aire cuya frecuencia es demasiado elevada para que pueda percibirlas el oído humano, que no es sensible más que a las vibraciones sonoras de frecuencia inferior a 10 000. Prácticamente, se consideran ultrasonidos las vibraciones del aire de frecuencia superior a 15 000.

Producción. — Para producir ultrasonidos se aprovecha el fenómeno de la piezoelectricidad o la magnetoestricción. El primer procedimiento es una aplicación del hecho de que un cristal de cuarzo convenientemente tallado (v. ELECTRICIDAD, pág. 116) se contrae cuando se producen cargas eléctricas sobre dos de sus caras opuestas, recobrando su forma primitiva al cesar aquéllas. Si se hace esta operación a una gran cadencia, por ejemplo, colocando el cristal de cuarzo entre las armaduras de un condensador recorrido por una corriente de frecuencia F, el cuarzo vibrará con la misma frecuencia y engendrará en el aire vibraciones de igual frecuencia; bastará entonces hacer que atraviese el condensador una corriente de frecuencia superior a 15 000 para obtener ultrasonidos.

En la práctica, la frecuencia utilizada depende de las dimensiones del cristal; es la frecuencia de resonancia del cristal. Pueden obtenerse fácilmente ultrasonidos de un millón de vibraciones por segundo.

La magnetoestricción se emplea para producir ultrasonidos graves, es decir, de menor frecuencia. El fenómeno de la magnetoestricción consiste en que un núcleo de níquel se dilata y se acorta en un campo magnético mientras un núcleo de hierro se comporta de la forma contraria. Se concibe entonces que si se colocan tales núcleos en un campo magnético alterno de gran frecuencia, provoquen vibraciones de la misma frecuencia en el aire que nos rodea. Los generadores de ultrasonidos de magnetoestricción son más sólidos que los cuarzos piezoeléctricos y permiten que se alcancen mayores potencias de emisión. Los ultrasonidos se propagan mal en los medios de poca densidad, sobre todo en el aire, siendo mejor su propagación en el agua y en los metales; por ello se utilizan principalmente los ultrasonidos para la detección en el agua.


Antena de radar en Fort Monmouth (E. U. A.) [*Fot. Agencia Intercontinental*]

Detección por ultrasonidos. — Los ultrasonidos pueden dirigirse más fácilmente que las ondas acústicas a causa de su menor longitud de onda (compárese con las ondas hertzianas). Son fácilmente realizables haces de ultrasonidos de algunos grados de abertura. Si se envía uno de tales haces sobre un obstáculo invisible, se producirá una reflexión, y, si puede detectarse la onda de retorno, se habrá detectado el obstáculo. Podremos conocer, incluso, la distancia a que se encuentra este obstáculo; basta para ello enviar, en vez de un haz continuo de ultrasonidos, trenes de ondas discontinuos. El tiempo que transcurra entre la salida de un tren de ondas y su regreso por reflexión dará la distancia a que se encuentra el obstáculo, si se conoce la velocidad del sonido en el medio considerado.

El método lo utilizan con éxito los murciélagos: estos animales son capaces, en efecto, de emitir y de oír ultrasonidos, y la percepción del eco de sus gritos ultrasonoros sobre los obstáculos les permite guiarse en la obscuridad con una gran precisión. Como el oído humano no es sensible a los ultrasonidos, hay que recurrir a un aparato detector que es, sencillamente, un cuarzo tallado, que, bajo el efecto de las vibraciones del aire, se comprime y descomprime a la frecuencia de las ondas. Al producirse sobre sus caras cargas eléctricas de la misma frecuencia, disponemos de una corriente fácil de detectar.

La detección por ultrasonidos fue muy empleada durante las dos guerras mundiales para localizar los submarinos enemigos. Este procedimiento, denominado *Asdic* por los ingleses, ha permitido localizar submarinos situados a cuatro kilómetros de distancia con un error de cien metros, y de un grado en cuanto a dirección. En tiempo de paz, los ultrasonidos se utilizan para los sondeos, pudiendo obtenerse un trazado continuo de los fondos submarinos registrando sobre una banda de papel las profundidades que indica el aparato. La pesca de altura utiliza también los ultrasonidos para localizar los bancos de peces.

Además de para la detección, los ultrasonidos se utilizan para obtener emulsiones, esterilizar los líquidos, y aun para lavar la ropa.

Radar

Se denomina "radar" el sistema que permite descubrir o localizar objetos mediante la captación de las ondas electromagnéticas ultracortas reflejadas o difundidas por esos objetos, tras haberles sido proyectadas por el propio aparato de radar.



Estación de radar del aeropuerto de Orly (Francia): pantallas del G. C. A. (*Great controlled approach*), tipo «gilfillan» (*Doc. Aeropuerto de Paris*)

Descripción. — La parte esencial de un radar es una lámpara de emisión de ondas ultracortas, o sea un magnetrón (v. pág. 221). La emisión es discontinua, con impulsiones de una millonésima de segundo de duración y de una frecuencia de 500 a 1 000 por segundo. Para obtener esta emisión se aplica al filamento del magnetrón una tensión alterna de frecuencia muy elevada, que se obtiene mediante descarga del condensador. La energía del magnetrón es transmitida a la antena por una guía de ondas. La antena sirve a la vez para la emisión y la recepción; se llega a este resultado "bloqueando" con dispositivos especiales la estación receptora durante las emisiones, y la emisora el resto del tiempo. La señal detectada se aplica al haz de un oscilógrafo catódico; si se ha producido eco o difusión, el haz pasa y se observa entonces una mancha luminosa sobre la pantalla fluorescente. Algunos aparatos de radar son panorámicos y permiten explorar el espacio que rodea a la emisora y obtener una imagen panorámica del mismo. Para ello se hace girar la antena y el haz del oscilógrafo con un movimiento sincrono y continuo. La pantalla fluorescente está cubierta de una substancia que hace que la fluorescencia adquirida bajo el efecto de los electrones tenga una persistencia igual al tiempo que tarda la antena en recorrer todo el espacio en su movimiento; así, cada vez que haya eco se producirá una mancha luminosa en la pantalla, y el conjunto de estas manchas proporcionará una vista panorámica de las siluetas de los obstáculos situados en la región explorada. La figura 663 representa la imagen de una vista aérea de una costa tal como es dada por un radar. El centro de la pantalla representa la posición de la emisora, por lo que la distancia de los obstáculos a esta emisora puede determinarse fácilmente. (También hay otros medios más complejos para determinar estas distancias.) No es necesario insistir sobre las utilizaciones del radar, tanto en época de guerra como en tiempo de paz, para la navegación aérea o náutica. Recordemos que en 1937 se instaló a bordo del transatlántico francés *Normandie* un aparato de radar a fin de detectar los icebergs.

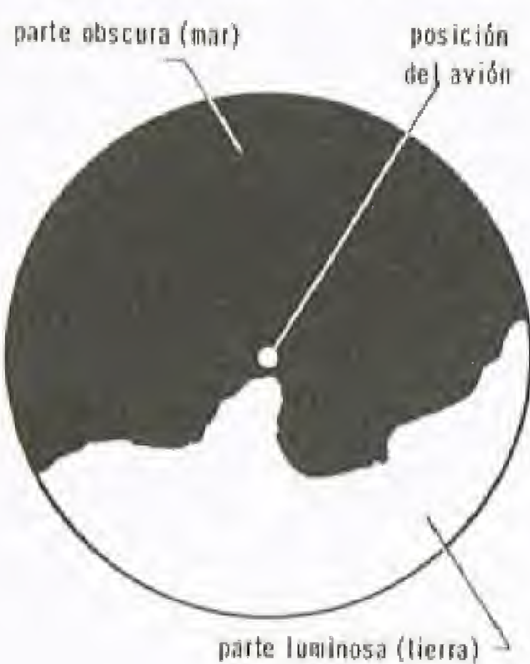
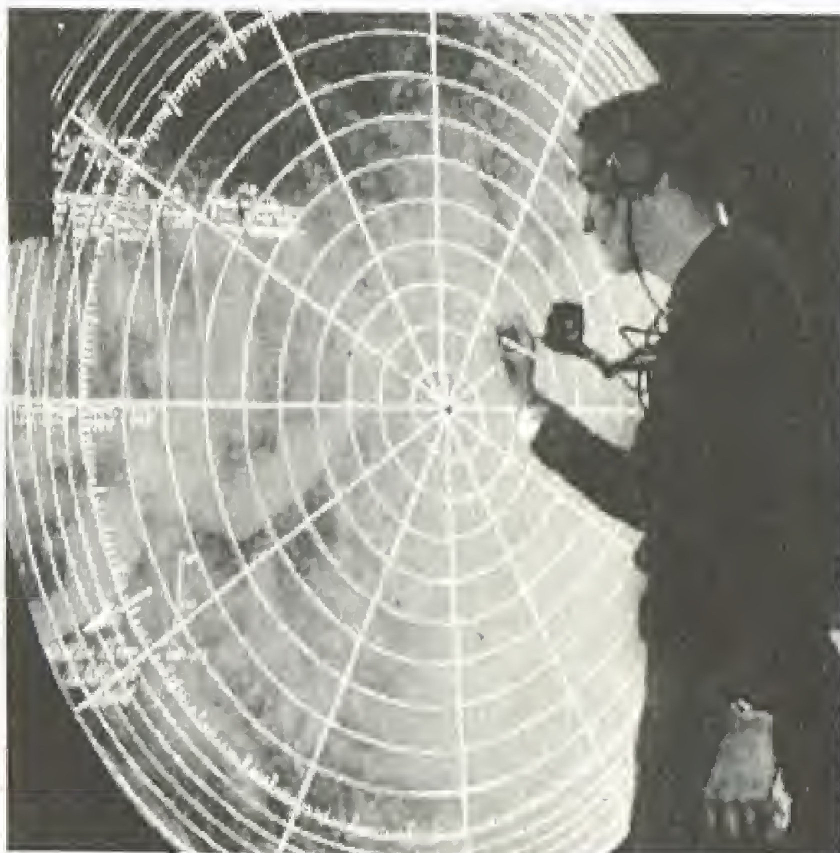


Fig. 663



Pantalla panorámica de un radar
(*Fot. J. Boyer*)

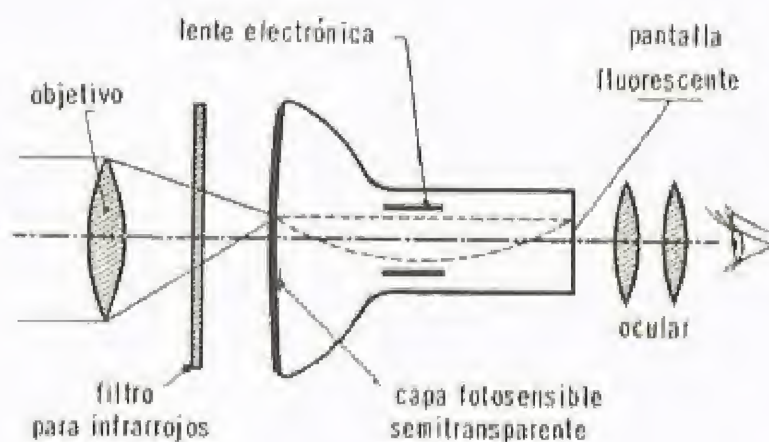


Fig. 664

Infrarrojos

En la detección por infrarrojos, los objetos son detectados ya por los rayos infrarrojos que emiten ellos mismos, ya por los que difunden cuando se proyecta sobre ellos un haz de estos rayos.

Detección de los rayos infrarrojos. — Se construyen capas fotosensibles que emiten electrones bajo la acción tanto de los rayos infrarrojos como de las radiaciones visibles (v. TEORÍAS MODERNAS, página 157). Estos electrones pueden ser dirigidos hacia el foco por medio de lentes electrónicas, sobre una superficie fluorescente, con lo que se obtendrá una reproducción de la imagen infrarroja en luz visible. Para que el aparato tenga una sensibilidad aceptable, es evidentemente necesario aumentar el número de electrones que emite la capa sensible mediante un multiplicador de electrones. La fig. 664 muestra un esquema de este tipo de aparato, que permite "ver" en infrarrojos. Se consigue así observar durante la noche sin ser visto, para lo que basta iluminar la escena con rayos infrarrojos, resultado que se obtiene con una lámpara cuyas radiaciones visibles son detenidas por un filtro.

La detección por infrarrojos se utilizó durante la segunda guerra mundial para los combates nocturnos. En astronomía, este mismo procedimiento permite "ver" estrellas apagadas, pero todavía calientes.

Química

Nociones preliminares

La química *es la ciencia que tiene por objeto el estudio de las transformaciones de los cuerpos en otros cuerpos diferentes por la naturaleza y por la disposición de los átomos en sus moléculas* (v. QUÍMICA GENERAL, pág. 237).

División de la química. — Según el estudio proseguido por el químico sea desinteresado o realizado con un fin práctico se distinguen la química pura y la química aplicada. La química pura comprende la **química general,** que tiende a determinar las leyes que rigen la interdependencia de los fenómenos químicos, y la **química descriptiva,** a su vez subdividida en **química mineral o inorgánica,** que trata de los cuerpos cuyo origen es independiente de la vida, y **química orgánica** o del *carbono,* que comprende todas las combinaciones del carbono producidas por los seres vivos o por síntesis.

La *química biológica* o *bioquímica,* prolongación de la química orgánica, estudia las reacciones en los tejidos vivos.

La *química física* introduce las medidas físicas en el estudio de las reacciones, sirviendo así de eslabón en la concatenación de los fenómenos físicos y químicos.

La *química aplicada* comprende las fabricaciones de los productos requeridos para satisfacer nuestras necesidades: química *agrícola, industrial, médica, farmacéutica,* etc.

Historia de la química

La química en la Antigüedad. — La *química,* tal como se la interpreta actualmente, no existía en los tiempos antiguos. El término que la designa no parece haber sido creado sino hacia el siglo IV antes de nuestra era. Sin embargo, desde la más remota Antigüedad, los chinos practicaban la cerámica, trabajaban los metales y conocían la pólvora. Los egipcios sabían purificar el oro, la plata y cierto número de metales, y aplicaban sus conocimientos químicos al embalsamamiento de las momias más de 5 000 años a. de J. C. Los griegos y los romanos explotaban las minas de oro, de cobre, de hierro, etc., fabricaban jabones, vidrios, objetos de alfarería, y 500 años a. de J. C. el filósofo griego **Leucipo** concibió ya los principios de la teoría atómica.

La alquimia. — En el siglo IX comenzaron a aparecer los alquimistas, herederos de la filosofía griega y de los conocimientos egipcios. Los primeros fueron los árabes: conocían la volatilidad del azufre, sabían combinarlo con todos los metales excepto con el oro. Conocían las amalgamas, el sublimado corrosivo, el bórax, el vitriolo, el agua regia, la nafta. Operaban por destilación o sublimación, por copelación, disolución y cristalización, por calcinamiento. A los cuatro elementos de Aristóteles: aire, agua, fuego y tierra, añadieron el mercurio y el azufre filosófico. Merecen ser citados **Geber** (siglo VIII), **Avicena** (979-1037) y **Averroes** (1126-1189).

Los alquimistas occidentales (del siglo XII al XVI) aislaron el bismuto, precisaron los conocimientos sobre el antimonio, el arsénico, el ácido sulfúrico, el ácido clorhídrico, el espíritu de vino, etc. Citemos a **Alberto Magno** (1193-1280), autor de la noción de afinidad, **Vicente de Beauvais** (muerto hacia 1264), **Arnaldo de Vilanova** (1240-1312), **Rogelio Bacon** (1214-1292), **Raimundo Lulio** (1235-1315) y, en el siglo XV, **Basilio Valentín.**

La mayor parte de los alquimistas intentaban llegar a transformar en oro todo metal vil gracias a la piedra filosofal, y por otra parte descubrir el elixir de la vida, panacea universal. En el siglo XVI, **Paracelso** (1493-1541), **Agricola** (1494-1555) y **Bernardo Palissy** (nacido hacia 1510, muerto en 1589 o 1590) comenzaron a liberarse de los errores de los alquimistas, erigiéndose en defensores del método experimental.

Primeros tiempos de la química. — El comienzo del desarrollo moderno de la química se sitúa en el siglo XVII. **Van Helmont** (1577-1644), demostró la fragilidad de los métodos antiguos e inauguró otros nuevos, que le permitieron descubrir la existencia de gases de naturaleza distinta a la del aire; **Roberto Boyle** (1627-1691) estudió la presión de los gases, reconoció el papel que juega el aire en la combustión, aisló el hidrógeno y el hidrógeno fosforado y estudió las soluciones salinas. Definió los ácidos, obtuvo la acetona, preparó el sulfato de mercurio, etc. Al lado de Van Helmont y de Boyle, que dominan la química del siglo XVII, hay que citar a **Glauber** (1604-1668), descubridor de la sal de Glauber (sulfato sódico hidratado); a Kunckel (1638-1703), que descubrió el fósforo después de **Brandt** (1675); a **Mayow** (1643-1679), que recogió los gases por desplazamiento de agua; a **Lemery** (1645-1715), autor de una química y de una clasificación de los cuerpos; a **Homberg** (1652-1715), que midió la densidad del aire y descubrió el ácido bórico; a **Bécher** (1635-1682), creador de una teoría sobre la acidez.



Huien-Huien, dios chino de la alquimia en traje de letrado

En el siglo XVIII, fueron descubiertos el ácido fosfórico, la magnesia y numerosas sales. Se conocieron numerosos metales nuevos. Se creó la química de los gases; se descubrieron y se estudiaron el nitrógeno, el oxígeno, el hidrógeno y el óxido de carbono. Es la época de la teoría **flogística,** debida a Stahl (1660-1734), hacia 1700.

Según ésta, el flogisto es el principio inflamable que impregna más o menos los cuerpos, según son más o menos combustibles. Se transmite de un cuerpo a otro por reacción química, etc. Al ser calentados, los metales pierden este flogisto y se transforman en "cales".

Las medidas físicas comenzaron a adquirir importancia: se sabía ya utilizar la balanza hidrostática. Se determinaron la densidad del mármol, del estaño, del oro, del aire y del gas carbónico. **Jorge Brandt** (1694-1768) descubrió el cobalto en 1735; **Cronstedt** (1722-1765), el níquel en 1751; **Scheffer** (1710-1759), el platino en 1752; **Gahn,** el manganeso en 1774; **Black** (1728-1799), la magnesia en 1755; **Marggraf** (1709-1782), la alúmina en 1754; **Fausto de Elhúyar** (1755-1833) aisló el wolframio en 1788. En 1766, se conocían ya muchas sales.

En cuanto a los gases, hay que citar los estudios de **Black** en 1754; los de **Cavendish** (1731-1810) sobre el hidrógeno, en 1765; los de **Priestley** (1733-1804) sobre el óxido nítrico, en 1772; el descubrimiento del nitrógeno en 1772; el del oxígeno y el cloro en 1774; el del amoníaco (1774) y el gas sulfuroso (1775). En química orgánica, se descubrieron el ácido fórmico (1749), los ácidos láctico y cítrico, la glicerina (1779), etc.

Lavoisier, fundador de la química moderna. — **Lavoisier** fue el fundador de la química moderna: el uso de la balanza, que introdujo de manera sistemática en química, constituyó el punto de partida del descubrimiento de las leyes fundamentales. Gracias a ella, pudo establecer la composición del aire y el mecanismo de la combustión (1771-1774). En 1782, **Guyton de Morveau** emprendió la tarea de crear una nomenclatura nueva con **Berthollet, Fourcroy** (1755-1809) y **Lavoisier.** Los rasgos esenciales de esta nomenclatura subsisten aún. En 1807, **Davy** (1778-1829) aplicó al análisis químico la pila que Volta había descubierto en 1800 y aisló los metales alcalinos y alcalinotérreos. En 1807, **Dalton** (1766-1826) descubrió la ley de las proporciones múltiples. **Proust** (1754-1826) estableció, en 1808, la ley de las proporciones definidas. **Gay-Lussac** (1778-1850) confirmó estas leyes (1809) al descubrir la ley relativa a los volúmenes que lleva su nombre. En 1811, **Avogadro** (1776-1856) enunció que dos volúmenes iguales de gases diferentes contienen el mismo número de moléculas. **Berzelius** (1779-1848) determinó la mayor parte de las masas atómicas (1826). Esta determinación fue facilitada por las leyes de **Dulong** y **Petit** sobre los calores específicos (1819) y la ley de **Mitscherlich** (1794-1863) sobre el *isomorfismo.*

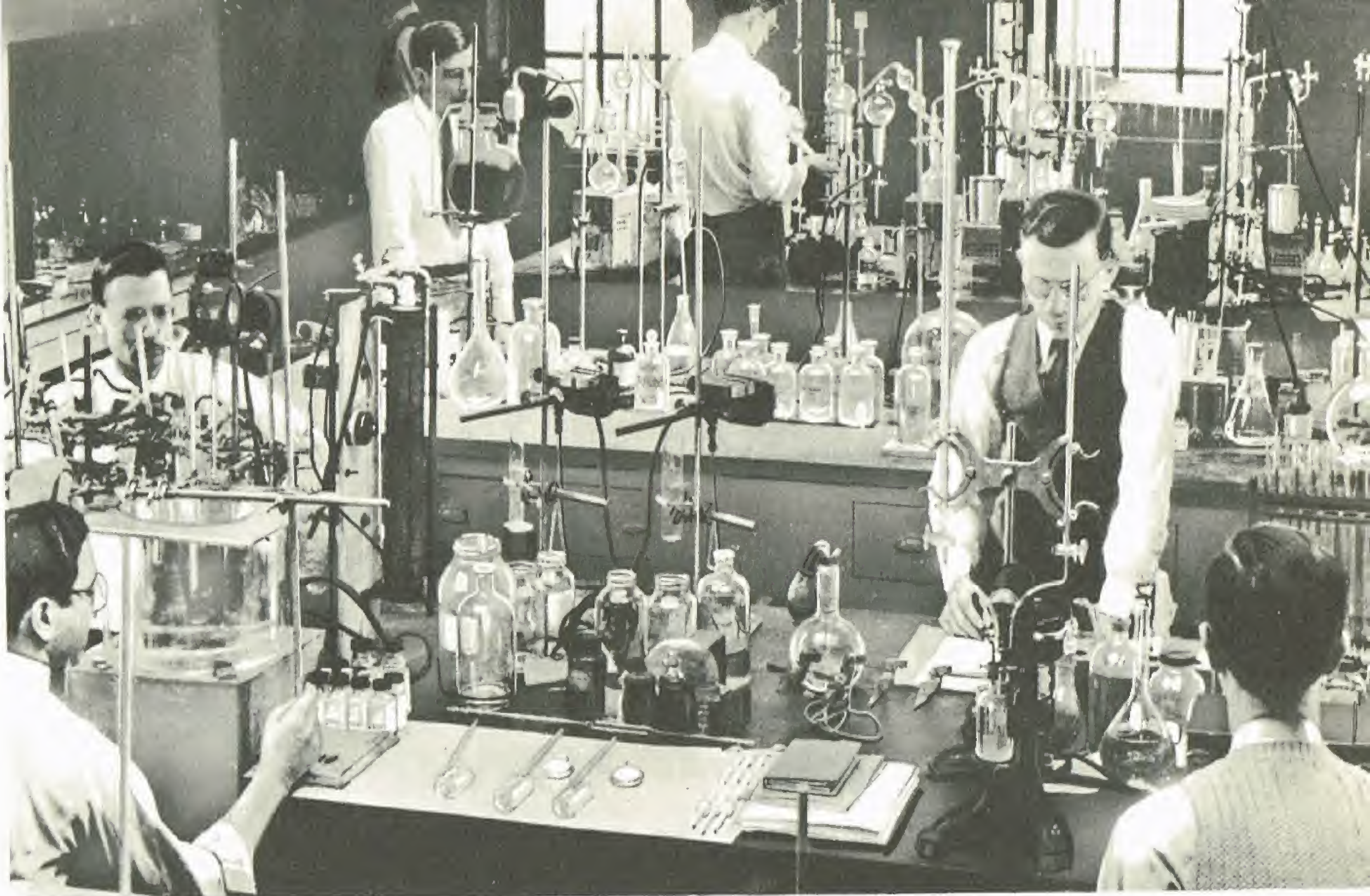
En ese momento, se descubrieron las grandes leyes numéricas en las que se apoya la química moderna. La química mineral se completó por el descubrimiento de la *poliatomicidad* (**Proust,** 1815; **Graham,** 1835) y de la *isomería* (**Faraday,** 1825; **Berzelius,** 1831). La clasificación de los elementos, intentada por **Ampère,** precisada por **Dumas** (1800-1884), determinó finalmente el establecimiento de la notación atómica.

Descubrimiento de nuevos elementos. — El análisis espectral, debido a los trabajos de **Bunsen** y **Kirchhoff,** permitió descubrir gran número de elementos nuevos: rubidio y cesio, por **Bunsen** (1861); talio, por **Crookes** (1862); indio, por **Reich** y **Richter** (1824-1871) [1863]; galio, por **Lecoq de Boisbaudran** (1838-1912) [1875].

Estudiando las sales depositadas en las salinas, **Balard** (1802-1876) descubrió el bromo en 1826; **Moissan** (1852-1907) aisló el flúor en 1887; lord **Rayleigh** (1842-1919) y sir **Ramsay** (1852-1916) retiraron del aire el argón, el kriptón, el neón y el xenón, y aislaron el helio.

En química general, **Sainte-Claire Deville** (1818-1881) halló los fenómenos de disociación; **Berthelot,** creador de la *termoquímica,* estudió los *equilibrios químicos;* **Raoult** (1830-1901) descubrió la *crioscopia* y la *tonometría.* En fin, citemos los trabajos de **Ostwald** (1853-1932), **Van't Hoff** (1852-1911) y **Arrhenius** (1859-1927) sobre la química física.

Durante los últimos años hemos asistido al rápido progreso de la química nuclear, que ha permitido la obtención de nuevos elementos, los **transuranianos.** Este ramo de la química está en pleno desarrollo.



Uno de los laboratorios de análisis en la sección de investigaciones químicas de la Compañía Dupont de Nemours (*Fot. U. S. I. S.*)

Química general

Naturaleza y propiedades de la materia

Especies químicas: Noción de especie química. Obtención de muestras de una especie química pura. Diferentes formas físicas de una misma especie química. Modificaciones físicas. Modificaciones químicas. Simultaneidad de los fenómenos físicos y químicos. Unidad de las ciencias físicas. Objeto particular de la química. — **Cuerpos puros, mezclas, separación de los constituyentes:** Mezclas y cuerpos puros. Caracteres de las mezclas. Caracteres de los cuerpos puros. Separación de los componentes de una mezcla: Análisis inmediato. Métodos mecánicos. Métodos físicos. Métodos químicos

Especies químicas

El estudio del químico abarca a la vez los **cuerpos naturales** y los **cuerpos artificiales,** cuya formación se realiza gracias a la intervención del hombre, y que son a veces idénticos a los cuerpos naturales.

El número de substancias que se presentan al examen del químico es considerable; las muestras, variadas hasta el infinito.

Para simplificar su estudio, el químico, imitando al naturalista, ha creado la noción de **especie química** comparable a la especie zoológica o botánica.

Noción de especie química. — Consideremos un fragmento de carbón de madera. Puede arder en el aire dando origen a un gas (anhídrido carbónico) que enturbia la lechada de cal. Este gas se forma a expensas de la substancia misma de la muestra. Sin embargo, la materia sólida no desaparece totalmente, puesto que queda un residuo de cenizas. El coque arde de manera análoga, y deja igualmente un residuo de cenizas. El químico supone que existe en el carbón de madera y en el coque un principio común que *se caracteriza por la combustión integral en anhídrido carbónico.*

El estudio de tal materia, si se consigue aislarla, constituye la base del de todas las muestras de carbón. Esta materia representará una **especie química** (se dice también *especie química definida, cuerpo puro, cuerpo químicamente puro*).

De esta manera queda definida la especie química *carbón puro* o *carbono,* que debe responder a las normas ya citadas.

Obtención de muestras de una especie química pura. — La noción *teórica* de especie química no puede satisfacer al químico, que debe esforzarse en obtener muestras que respondan a las condiciones exigidas por la definición de cuerpo puro.

Es posible encontrar tales muestras, ya formadas, en la naturaleza.

Así, el **diamante,** como ha demostrado Lavoisier, puede convertirse en anhídrido carbónico por combustión en el oxígeno sin dejar residuo apreciable de cenizas. El diamante representa una forma de carbono puro.

Ciertas variedades de **grafito,** mineral muy blando utilizado para fabricar lápices, están constituidas por carbono en el que la proporción de impurezas es inferior al 1/1 000, por lo que pueden ser consideradas como carbono puro.

Al lado de las substancias naturales, cabe obtener artificialmente cuerpos puros.

Así, si se calienta **azúcar** en un recipiente casi cerrado, o se descompone el **acetileno** mediante una chispa eléctrica, se obtienen carbones puros que se queman sin dejar cenizas, y que, por lo tanto, son aptos para representar la especie química.

La mayor parte de las veces, las especies químicas se encuentran en mezclas, ya en substancias naturales, ya en las masas brutas de operaciones industriales o de laboratorio.

Diferentes formas físicas de una misma especie química. — El diamante es el más puro de todos los minerales conocidos; el grafito, uno de los más blandos. Estos dos cuerpos, a pesar de ser tan diferentes desde el punto de vista físico, constituyen formas diferentes de carbono puro. Así, pues, la noción, abstracta, de especie química permite establecer un paralelismo entre substancias dispares.

Este ejemplo nos ayuda a comprender por qué ciertas transformaciones de cuerpos, ciertas modificaciones, no afectan a la *naturaleza de la especie química.*

Tales modificaciones se conocen con el nombre de *modificaciones físicas*.

Modificaciones físicas. — Contrariamente al grafito, el carbón de azúcar no se presenta en forma cristalizada.

Si se calienta este carbón durante un tiempo suficientemente largo, puede transformarse en *grafito*, presentando entonces caracteres muy netos de cristalización. Una transformación de este tipo no modifica la naturaleza de la especie química. Se trata en este caso de una **transformación física.**

El *agua pura* constituye una especie química definida. Si la enfriamos, se transforma en hielo; si la calentamos, se vaporiza.

Sin embargo, se admite que aun presentada en **tres estados físicos** diferentes, la substancia no deja de constituir una misma especie química. La *fusión*, la *vaporización*, lo mismo que, inversamente, la *solidificación* y la *condensación*, son **modificaciones físicas.**

Otro tanto se puede decir de la *disolución*, así como del fenómeno inverso, la *cristalización*.

Al ponerse en contacto con el agua, el azúcar se disuelve sin que por ello se modifique su naturaleza química. Al evaporarse el solvente, el azúcar vuelve a adquirir su forma primitiva.

Modificaciones químicas. — Calentemos al rojo, en un crisol, un pedazo de *creta* (carbonato cálcico). Comprobaremos que se desprende un gas (anhidrido carbónico). El residuo sólido (cal viva) puesto en contacto con agua, una vez enfriado, provoca un desprendimiento considerable de calor; si ponemos en contacto con la substancia un papel de *tornasol rojo*, humedecido con agua, éste se vuelve *azul*. La creta no presentaba estas propiedades. Por lo tanto, la transformación experimentada por el carbonato cálcico no puede ser asimilada a la vaporización del agua o a la transformación del carbón de azúcar en grafito.

La modificación ha dado lugar a la aparición de *cuerpos nuevos*.

Se dice, en este caso, que la transformación del carbonato cálcico es una **modificación química.**

Toda modificación química se caracteriza por la aparición de **nuevas especies químicas,** *formadas a expensas de las primitivas.*

Simultaneidad de los fenómenos físicos y químicos. — Es raro el caso de una modificación química que no vaya acompañada de fenómenos físicos.

Así, la *descomposición* del carbonato cálcico ha sido provocada por una *elevación de la temperatura*. Inversamente, la *transformación química* (combustión) del carbono en anhídrido carbónico va acompañada de un *desprendimiento de calor* considerable. La acción de los *rayos luminosos* provoca el ennegrecimiento de un papel fotográfico, gracias al depósito de plata formado a expensas de la substancia que lo impregna. Inversamente, la *oxidación* lenta del fósforo va acompañada de una *emisión de luz* (fosforescencia).

Otro tanto ocurre con las acciones eléctricas: ciertas substancias son *descompuestas* por la corriente *eléctrica* (electrólisis), que, por su parte, puede haber sido generada por *acciones químicas* realizadas en una pila.

Unidad de las ciencias físicas. Objeto particular de la química. — La trabazón íntima de los fenómenos físicos y químicos determina que se considere la química como la prolongación natural de la **física.** A menudo se reúnen esas dos disciplinas bajo el título común de **ciencias físicas.**

Sin embargo, físicos y químicos tienen sus métodos propios de trabajo, y la distinción entre ambas ciencias se justifica tanto desde el punto de vista de la investigación como desde el de la enseñanza.

La química se reserva como campo particular el estudio de las transformaciones que afectan a la **naturaleza de las especies químicas.**

La **química física,** de creación más reciente, se esfuerza por asociar los dos aspectos, físico y químico, de los fenómenos.

Cuerpos puros, mezclas, separación de los constituyentes

Mezclas y cuerpos puros. — Destilemos agua del mar en un alambique: el agua recogida en el condensador no tiene ya sabor salado. Congelemos incompletamente otra porción de agua del mar por medio de una mezcla refrigerante: el hielo así obtenido estará igualmente desprovisto de sabor salado.

Aislemos el agua después de una u otra de esas operaciones, y sometámosla a nuevos tratamientos análogos a los precedentes: se comprobará que no se obtiene una substancia cualquiera diferente del líquido inicial.

Se dice que el agua del mar constituye una **mezcla,** mientras que el líquido procedente de la destilación o de la congelación parcial de dicha agua es un **cuerpo puro,** muestra de una **especie química definida.**

Caracteres de las mezclas. — Una mezcla es definida por los caracteres siguientes:

1º Es posible separarla en fracciones de propiedades diferentes;

(El agua destilada es diferente del residuo salino que se encuentra en el alambique al final de la operación.)

2º Los diversos componentes conservan sus propiedades principales; las propiedades de la mezcla son intermediarias;

(El agua del mar es líquida como el agua pura, pero es más densa; tiene el sabor de la sal.)

3º Cuando se ponen en contacto las fracciones separadas, se reconstituye la mezcla inicial.

(El agua destilada disuelve de nuevo el residuo salino y regenera el agua del mar; esta condición es importante y permite justificar el método.)

Ulteriormente tendremos ocasión de exponer otras particularidades.

Las condiciones que acabamos de enunciar son *necesarias* para que una substancia pueda ser considerada como una mezcla.

Más adelante veremos que el agua puede descomponerse, pero las fracciones así obtenidas no regeneran el agua por simple contacto.

Caracteres de los cuerpos puros. — Los cuerpos puros tratados por los métodos de separación tales como la destilación, la congelación fraccionada y otros que describiremos luego, son incapaces de producir fracciones diferentes entre sí y diferentes del cuerpo primitivo. Presentan una constancia absoluta en las características físicas, densidad, índice de refracción, conductibilidad eléctrica, etc.; cuando se les puede hacer hervir o fundir, hierven o se funden a temperaturas fijas perfectamente determinadas.

La determinación de las constantes físicas (temperaturas de fusión, de ebullición, densidad, etc.) permite comprobar la *pureza* de una muestra e *identificarla*.

Separación de los componentes de una mezcla: Análisis inmediato. — Cuando no se trate de un cuerpo puro, se puede considerar que una substancia está formada por una mezcla más o menos compleja de cuerpos puros. La *separación de los diversos componentes*, o, lo que es lo mismo, el *análisis inmediato*, constituye una operación de importancia capital tanto en química pura como en química aplicada, puesto que permite aislar las especies químicas.

Naturalmente, esta separación es tanto más difícil cuanto mayor es el número de los componentes o más reducida su proporción relativa.

Los métodos de separación no deben modificar las especies químicas y, por lo tanto, deben consistir en acciones **mecánicas** o **físicas.** Sin embargo, se pueden utilizar ciertos métodos **químicos** capaces de convertir determinados componentes en otros cuerpos diferentes, a fin de poder separarlos de los demás componentes con mayor facilidad.

Nos es imposible extendernos sobre estas técnicas, por lo que nos limitaremos a dar al lector las nociones fundamentales.

Métodos mecánicos. — Citaremos la *selección a mano*; por *corriente de agua*, que arrastra las partículas finas; la *filtración*, que permite separar los sólidos y los líquidos; la *decantación*, separación por orden de densidad de líquidos no miscibles; la *centrifugación*, que conduce al mismo resultado con mayor rapidez, etc.

Métodos físicos. — Comprenden principalmente: la *destilación fraccionada* (*fig.* 1), que permite separar los líquidos que hierven a temperaturas diferentes (aplicación en las industrias del alcohol, el petróleo, etcétera); la *congelación fraccionada* (enfriando la esencia de anís líquida, se extrae el principio oloroso, el anetol, que se separa en estado sólido); la *disolución fraccionada*, que saca provecho de las

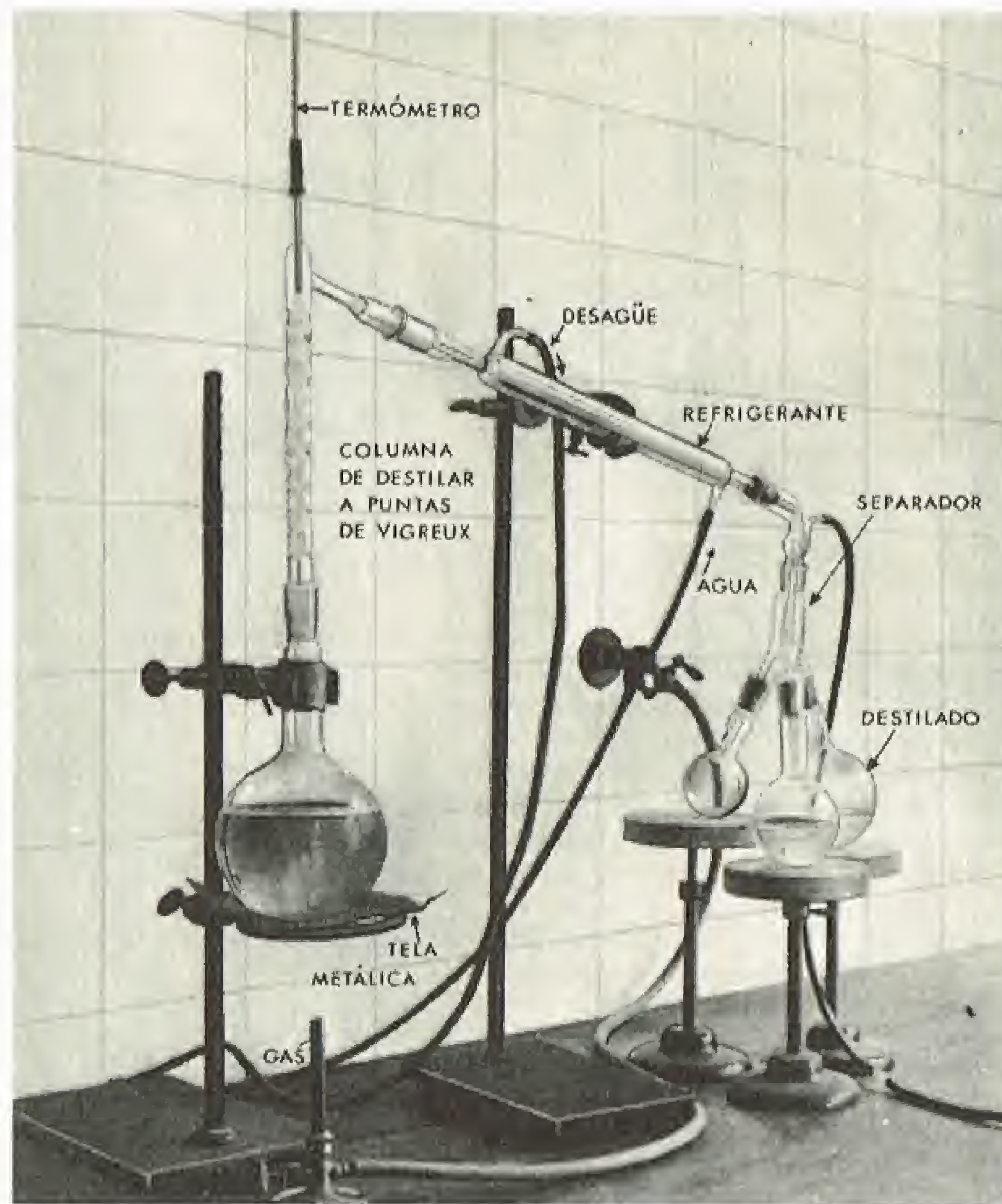


Fig. 1

diferencias de solubilidad de los componentes con respecto a un solvente determinado; la *cristalización fraccionada*, que permite obtener en estado puro, a partir de una solución, los cristales del compuesto menos soluble, que tiende a depositarse el primero. (Excepción: v. ISOMORFISMO, p. 242.)

Métodos químicos. — En ciertos casos, se puede volver del componente transformado químicamente al cuerpo primitivo. Así, los fenoles contenidos en los benzoles brutos se separan de éstos agitándolos con una lejía de sosa. Los fenoles se combinan y pasan a la solución; los benzoles, insolubles, sobrenadan. Mediante adición de un ácido, se pueden regenerar los fenoles que en la primera operación se habían combinado con la sosa.

En otros casos, la regeneración del componente primitivo es imposible, o bien resulta demasiado difícil u onerosa para ser practicada. Se opta entonces por sacrificar el cuerpo.

Elementos y compuestos

Cuerpos compuestos. Cuerpos simples. Análisis. Síntesis. Caracteres distintivos de las mezclas y de las combinaciones. Campo de estabilidad de las combinaciones o de las mezclas. Elementos. Transmutación de los elementos

Cuerpos compuestos. — La especie química **agua,** que resiste a todos los ensayos físicos de separación antes descritos, se puede descomponer por efecto de la corriente eléctrica en dos gases: el *hidrógeno* y el *oxígeno.* En este caso, no cabe poner en duda el carácter *químico* de la transformación: en efecto, las propiedades del agua son totalmente diferentes de las de cada uno de esos gases.

Se dice que el agua es un **cuerpo compuesto** o una **combinación.**

Cuerpos simples. — Todos los intentos que puedan realizarse para descomponer a su vez el hidrógeno o el oxígeno resultarán estériles.

El hidrógeno, el oxígeno y, de una manera general, todos los cuerpos que *no se descomponen en una mezcla de otros,* cualquiera que sea la acción a que se les someta, son **cuerpos simples.**

La descomposición de una combinación no conduce obligatoriamente a su transformación en cuerpos simples en una sola operación; así, el carbonato cálcico se escinde por efecto del calor en cal viva y anhídrido carbónico, que son ambos cuerpos compuestos. A su vez, estas combinaciones pueden descomponerse en cuerpos simples.

Por lo tanto, las especies químicas se dividen en dos grandes clases: los cuerpos simples y los cuerpos compuestos o combinaciones.

Análisis. Síntesis. — La descomposición de las *combinaciones* en cuerpos simples se llama **análisis elemental,** por oposición al **análisis inmediato.**

El análisis elemental del agua puede efectuarse por electrólisis.

La operación inversa del análisis es la **síntesis,** cuyo objeto es formar la combinación a partir de los elementos que la constituyen (cuerpos simples).

Se realiza fácilmente la síntesis del agua quemando hidrógeno en una atmósfera de oxígeno.

El análisis y la síntesis son operaciones fundamentales de la química. Permiten determinar las composiciones de todas las especies químicas y constituyen, además, medios de acción muy eficaces.

El análisis se llama **cualitativo** cuando se limita a determinar la *naturaleza* de los cuerpos que forman una combinación.

Se le denomina **cuantitativo** cuando se propone fijar las *proporciones* relativas de dichos cuerpos.

Caracteres distintivos de las mezclas y de las combinaciones. — Al contrario de las mezclas, las combinaciones no poseen las propiedades medias de los cuerpos simples que las componen: el agua no acusa una sola de las propiedades físicas o químicas del oxígeno y el hidrógeno. Los cuerpos compuestos no pueden regenerarse como las mezclas por simple yuxtaposición de los elementos. Así, a la temperatura ordinaria, la mezcla de hidrógeno y oxígeno, que posee absolutamente las propiedades medias de ambos gases, no es idéntica al agua.

Campo de estabilidad de las combinaciones o de las mezclas. — La mezcla de hidrógeno y oxígeno resultante de la electrólisis del agua es indefinidamente estable a la temperatura ordinaria. Sin embargo, si se la calienta a 150° C, comienza a producirse la formación de agua, y ésta es total hacia 850° C.

Por lo tanto, la mezcla no es estable en todas las zonas de temperatura, sino solamente por debajo de 150° C.

El carbonato cálcico, especie química pura, se descompone cuando se le calienta al rojo vivo. Por lo tanto, no es estable más que a temperaturas más bajas. Las variaciones de presión modifican las temperaturas límites de estabilidad.

De estas observaciones, concluimos que *tanto las combinaciones como las mezclas pueden subsistir sin sufrir transformaciones químicas* solamente entre ciertos límites de temperatura y de presión, que definen su **campo de estabilidad.**

Esta consideración ofrece un interés capital cuando se trata de decidir si una substancia constituye una mezcla o un cuerpo puro.

Elementos. — Se llama **elementos** a los componentes de las combinaciones. Los elementos son, pues, sencillamente los cuerpos simples. De todas maneras, cuando se dice que el agua está constituida por los *elementos* hidrógeno y oxígeno, se da por supuesto que los *cuerpos simples,* hidrógeno y oxígeno, han perdido en el agua sus propiedades particulares.

Transmutación de los elementos. — Hasta principios del siglo xx, había sido imposible observar el paso de un cuerpo simple a otro cuerpo simple, o bien formar, en una combinación, un elemento a expensas de otro elemento. (Los alquimistas habían intentado en vano obtener oro a partir de metales viles.)

Sin embargo, en los elementos radiactivos se comprueban varios pasos *espontáneos* de un elemento a otro, por ejemplo del torio al plomo, a través de una serie de estados intermedios. Actualmente, es posible realizar en el laboratorio pasos o **transmutaciones** análogos (v. FÍSICA, p. 165).

Por lo tanto, hablando con toda propiedad, se puede decir que *los cuerpos simples no son independientes unos de otros.*

Sin embargo, dado el carácter excepcional de los cuerpos radiactivos y el rendimiento ínfimo de las transmutaciones provocadas, que hasta la fecha no han desbordado el campo de los físicos, diremos que **a la escala de las reacciones químicas se puede considerar que los elementos no se transmutan unos en otros.**

Leyes de la química

Ley de la conservación de las masas o ley de Lavoisier. Principio de la conservación de los elementos. Peso y masa. Ley de las proporciones definidas o ley de Proust. Ley de las proporciones múltiples o ley de Dalton. Interpretación de la ley de Dalton. Números proporcionales. Ensayo de determinación del número proporcional del oxígeno. Números proporcionales del nitrógeno y el cloro. Justificación de la noción de números proporcionales. Ley de Richter o de los números proporcionales. Sistemas de números proporcionales. Leyes de las relaciones volumétricas o leyes de Gay-Lussac

Ley de la conservación de las masas o ley de Lavoisier. — La ley de Lavoisier consagra el principio de la indestructibilidad de la materia, principio ya entrevisto en la Antigüedad y enunciado por la fórmula "Nada se crea ni se destruye". Es el fundamento mismo de la química. Se la puede formular así:

En toda transformación química, la masa total de los cuerpos resultantes es igual a la masa total de los cuerpos que desaparecen.

La ley de Lavoisier puede ser comprobada experimentalmente. Se introducen por separado dos reactivos en los brazos de un tubo de vidrio en forma de V. Se cierra herméticamente el tubo con un soplete y se le tara en una balanza. Se le invierte a fin de provocar la mezcla de los dos reactivos. Una vez efectuada la reacción, se observa que el peso del tubo es el mismo que antes de la reacción.

La ley de Lavoisier debe ser considerada como una **ley absoluta** para *todas las transformaciones que pueden ser realizadas.*

Sin embargo, sólo es **rigurosamente** exacta cuando se la considera asociada con la ley de la conservación de la energía (v. TEORÍA DE LA RELATIVIDAD, pág. 178).

Principio de la conservación de los elementos. — Ya hemos visto que, en las transformaciones *puramente químicas, no se efectúan* las transmutaciones de un elemento en otro.

Esta observación, asociada con la ley de Lavoisier, nos conduce al principio de la conservación de los elementos, que puede enunciarse así:

En toda transformación química, la masa total de un elemento cualquiera permanece invariable.

Así, cuando se descomponen 100 g de carbonato cálcico, que contienen 12 g de carbono, 48 g de oxígeno y 40 g de calcio, los 12 g de carbono se encuentran en el anhídrido carbónico, y los 40 g de calcio en la cal viva. En cuanto a los 48 g de oxígeno, se hallan distribuidos en las dos combinaciones, a razón de 32 g en el anhídrido carbónico y 16 g en la cal.

Peso y masa. — Ya sabemos que los términos *masa* y *peso* no son sinónimos (v. pág. 226, vol. V).

Ahora bien, como en un mismo lugar el peso y la masa de los cuerpos son magnitudes rigurosamente proporcionales, se puede emplear indiferentemente uno u otro término en los enunciados.

Ley de las proporciones definidas o ley de Proust. — La ley de Proust, enunciada en 1799, puede ser expresada en dos formas equivalentes.

I. La composición de una especie química determinada es siempre constante.

Este enunciado traduce directamente los resultados del *análisis*. Así, todas las muestras de agua pura tienen la misma composición. Se encuentran siempre 11,2%, en peso, de hidrógeno, y 88,8% de oxígeno. Cualquiera que sea su origen, el carbonato cálcico presenta la composición ponderal siguiente: carbono, 12%; oxígeno, 48%; calcio, 40%.

El enunciado II pone de relieve el punto de vista de la *síntesis:*

II. Cuando se unen dos elementos para formar un compuesto definido, la relación entre los cuerpos que reaccionan es constante.

Cuando se quema carbono en una atmósfera de oxígeno para formar anhídrido carbónico, se comprueba que 3 g de carbono se unen siempre a 8 g de oxígeno. Si hubiese un exceso de oxígeno, la fracción que no se hubiera combinado con el carbono se encontraría inalterada al final de la reacción.

Cuando se combinan la cal y el anhídrido carbónico para dar carbonato cálcico, se unen siempre 14 g de cal y 11 g de anhídrido carbónico.

La ley de las proporciones definidas da cuenta de la diferencia esencial que existe entre una **combinación** de *composición constante* y una **mezcla** cuya *composición se puede modificar a voluntad.*

Ley de las proporciones múltiples o ley de Dalton. — Ocurre frecuentemente que dos elementos pueden formar no sólo *una*, sino *varias* combinaciones.

Es precisamente el caso del carbono y el oxígeno. Al lado del anhidrido carbónico se puede formar el óxido de carbono.

La **ley de Dalton,** formulada hacia 1803, se refiere a las composiciones ponderales de las combinaciones múltiples de dos elementos. Puede ser enunciada así:

Cuando dos elementos, A y B, forman varias combinaciones, el análisis muestra que, a un mismo peso de A, corresponden sucesivos pesos de B proporcionales a números enteros sencillos: 1, 2, 3, 4, 5, etc.

Comparemos las composiciones de las dos combinaciones de *carbono* y *oxígeno*. El anhidrido carbónico contiene 2,66 g de oxígeno por 1 g de carbono. El óxido de carbono contiene 1,33 g de oxígeno por 1 g de carbono. Las masas 2,66 y 1,33 están en la proporción de 2 a 1.

El azufre y el oxígeno forman dos combinaciones: el *anhidrido sulfuroso* y el *anhidrido sulfúrico.*

En la primera, 1 g de azufre está combinado con 0,998 g de oxígeno. En la segunda, 1 g de azufre está combinado con 1,497 g de oxígeno. La relación $\frac{0,998}{1,497}$ es sensiblemente igual a $\frac{2}{3}$. Las masas de oxígeno unidas a una misma masa de azufre en las dos combinaciones forman la misma relación que los números enteros 2 y 3.

La ley de Dalton muestra que las *combinaciones* entre dos elementos presentan *discontinuidades* bruscas de composición. Por tal razón, el número de dichas combinaciones es *limitado.*

Por el contrario, la composición de mezclas, como el agua salada, puede variar de manera *continua*. Así, existe una *infinidad* de mezclas de agua y sal.

Interpretación de la ley de Dalton. — La ley de Dalton establece la hipótesis de que los cuerpos reaccionan por *masas unitarias.*

Las composiciones del óxido de carbono y del anhídrido carbónico se interpretan fácilmente si se admite que una masa unitaria C de carbono está unida a una masa unitaria O de oxígeno en el óxido de carbono, y a dos de dichas masas en el anhídrido carbónico.



Miniatura alemana de un tratado de alquimia (segunda mitad del siglo XVI) [*Fot. Larousse*]

Números proporcionales. — La determinación, efectuada por análisis o por síntesis, de la composición de las combinaciones permite atribuir a cada elemento un número que puede representar la masa unitaria correspondiente.

Tal número es conocido con el nombre de **número proporcional.**

Los números proporcionales no pueden ser determinados de una manera *absoluta* por los resultados del análisis, que indican solamente las *relaciones* entre los componentes.

Por lo tanto, conviene dar el valor 1 al número proporcional de un elemento elegido arbitrariamente, para así poder determinar todos los demás.

A este efecto, se toma el **hidrógeno,** cuya masa unitaria es la menor de todas las conocidas.

En estas condiciones, los números proporcionales de los demás elementos se expresan mediante números mayores que 1.

Ensayo de determinación del número proporcional de oxígeno. — De la composición del agua se deduce un valor del número proporcional del *oxígeno*. El análisis y la síntesis del agua indican que contiene 7,97 g de oxígeno unidos a 1 g de hidrógeno.

Por lo tanto, se puede proponer como número proporcional del oxígeno el valor **7,97,** u **8** para simplificar.

Sin embargo, debemos considerar que puede también adoptarse el valor **16,** doble del precedente.

En efecto, basta admitir que, en el agua, son **dos,** y no una, las masas unitarias de hidrógeno combinadas con una masa de oxígeno, que en tal caso adquiere un valor doble.

Considerando la cuestión con todo rigor, no *debe descartarse* tampoco *a priori* el valor **4** del número proporcional del oxígeno.

De estos razonamientos concluimos que:

El análisis químico no puede determinar la magnitud de los números proporcionales de los elementos a ciencia cierta; los valores que propone son indeterminados y pueden representar tanto el número proporcional como un múltiplo o un submúltiplo entero del mismo.

Más adelante veremos cuáles son las hipótesis suplementarias que resuelven esta indeterminación.

Números proporcionales del nitrógeno y el cloro. — El **nitrógeno** da lugar a 5 *combinaciones oxigenadas*, en las que 1 g de nitrógeno está unido, respectivamente, a 0,57, 0,57 × 2, 0,57 × 3, 0,57 × 4, 0,57 × 5 gramos de oxígeno.

Si suponemos que una masa unitaria de nitrógeno se halla combinada, respectivamente, con 1, 2, 3, 4, 5 masas unitarias de oxígeno y adoptamos el valor 8 como número proporcional del oxígeno, encontramos el valor $\frac{1 \times 8}{0,57} = 14$, aproximadamente, correspondiente al número proporcional del nitrógeno.

Naturalmente, los valores **7, 28,** etc., pueden ser tenidos en consideración.

Puede tomarse el valor **35,5** para el número proporcional del **cloro,** magnitud justificada por la composición del *ácido clorhídrico*, que contiene **35,5** partes de cloro por 1 parte de hidrógeno, en peso.

Justificación de la noción de números proporcionales. — Los valores 1, 8, 14, 35,5 propuestos como números proporcionales del hidrógeno, el oxígeno, el nitrógeno y el cloro han sido deducidos de la *composición de combinaciones particulares, arbitrariamente elegidas* (en nuestro caso, agua, óxidos de nitrógeno, ácido clorhídrico).

Naturalmente, esta determinación es solamente digna de interés porque *esos mismos valores se imponen* cuando se examina la constitución de *todas las combinaciones posibles de dichos elementos*. Es lo que explica la ley de Richter y Wenzel.

Ley de Richter o de los números proporcionales. — **Cuando 3 elementos A, B, C son capaces de combinarse de dos en dos, si se designa por *a* el peso de A y por *b* el peso de B que intervienen cuando se combinan A y B y se designan por otra parte *a'* y *b'* los pesos de dichos elementos que se unen a un mismo peso de C en las combinaciones de A con C y de B con C, existe entre estos cuatro valores la relación**

$$\frac{\quad}{b} = \frac{p}{q} \times \frac{a'}{b'},$$

en la que los dos términos de la fracción $\frac{p}{q}$ son generalmente números enteros sencillos.

Esta ley se puede enunciar también de la manera siguiente:

Dos elementos que se unen a un mismo peso de un tercero se unen entre sí en la misma proporción afectada por un factor $\frac{p}{q}$.

Consideremos el hidrógeno, el oxígeno, el cloro, unidos de dos en dos en el agua, el ácido clorhídrico y el clorato potásico.

1 parte de hidrógeno está unida a 8 partes de oxígeno en el agua.

1 parte de hidrógeno está unida a 35,5 partes de cloro en el ácido clorhídrico.
48 partes de oxígeno están unidas a 35,5 partes de cloro en el clorato potásico.
Entre los números 1 y 8 (*a* y *b*), y 1 y 48 (*a'* y *b'*), se establece la relación

$$\frac{1}{8} = \frac{6}{1} \times \frac{1}{48}.$$

Los términos de la fracción $\frac{p}{q} = \frac{6}{1}$ están constituidos por números enteros sencillos.

Sistemas de números proporcionales. — Teóricamente, se pueden concebir numerosos sistemas de números proporcionales.
Prácticamente, la indeterminación que pesa sobre el valor de cada número proporcional se disipa con relativa facilidad y, en el transcurso del tiempo, los químicos se han servido solamente de dos sistemas:
El sistema de los *equivalentes*, que sirve aún de base para ciertos cálculos cuantitativos de química analítica y en el que el número proporcional del oxígeno es **8;**
El sistema de las *masas atómicas*, de aplicación más general.
En el sistema de las masas atómicas, el número proporcional, o masa atómica, del oxígeno es igual a **16.**

Leyes de las relaciones volumétricas o leyes de Gay-Lussac. — Las leyes de Lavoisier, Proust, Dalton y Richter son las leyes **ponderales** de la química, puesto que se refieren a los pesos o masas de los cuerpos que se combinan.
Las leyes de Gay-Lussac son **volumétricas,** es decir, tienen en cuenta los *volúmenes* de los cuerpos considerados en estado *gaseoso* o de *vapor*. Se enuncian así:
I. Cuando dos cuerpos gaseosos reaccionan entre sí, lo hacen según una relación de volumen sencilla.
II. Existe una relación sencilla entre los volúmenes gaseosos de los cuerpos formados y los volúmenes gaseosos de los cuerpos que desaparecen durante la reacción.
Naturalmente, para poder comparar los volúmenes de los gases o de los vapores, hay que hacer las medidas *en las mismas condiciones de temperatura y de presión.*
Los ejemplos siguientes se deducen de las leyes de Gay-Lussac:
1 volumen cualquiera de *hidrógeno* se combina con **1** volumen igual de *cloro* y origina **2** veces este volumen de *gas clorhídrico.*
1 litro de *nitrógeno* reacciona con **3** litros de *hidrógeno* para dar **2** litros de *gas amoníaco.*
2 litros de *hidrógeno* se unen con **1** litro de *oxígeno* y dan **2** litros de vapor de *agua.*
Las leyes de Gay-Lussac ofrecen el mismo grado de aproximación que la ley de Mariotte.

Moléculas y átomos

Las moléculas. — Aunque los cuerpos materiales, el hierro, el agua, etc., ofrecen a primera vista una apariencia continua, se ha llegado a pensar que su estructura podía ser **corpuscular.**
Se admite hoy que la materia está constituida por unas partículas materiales extraordinariamente pequeñas llamadas **moléculas,** *separadas unas de otras por grandes espacios vacíos a la manera de las estrellas en el firmamento.*
Lo que se llama el *volumen* de un cuerpo comprende a la vez el volumen real, pequeño, de las moléculas y el espacio vacío que las separa.
Las moléculas se encuentran en estado de agitación perpetua. Brown demostró, en 1827, que partículas muy finas en suspensión en un líquido, visibles al microscopio, presentan movimientos incesantes y desordenados causados por los choques que provocan contra ellas las moléculas del líquido (movimiento browniano).

Justificación de la hipótesis molecular. — La hipótesis molecular se justifica por todas las consecuencias que había previsto y que han podido ser comprobadas. Las interpretaciones que da de los fenómenos físicos y químicos son por demás simples.
En particular, explica la *dilatación* de los cuerpos, que tiene lugar sin que la masa se modifique, por simple aumento de la distancia media entre las moléculas. La elevación de la temperatura es la consecuencia directa de una agitación mayor; la presión de los gases resulta de los choques de las moléculas contra las paredes del recipiente que los contienen.
Permite precisar la noción de cuerpo puro y de mezcla: **un cuerpo puro o especie química definida está constituido por moléculas de igual naturaleza; una mezcla comprende moléculas de naturaleza diferente.**

Atomos. — La descomposición de las **combinaciones** demuestra que las moléculas de los cuerpos compuestos no son indivisibles. En cambio, los **elementos,** en cuanto tales, deben estar constituidos por partículas que no se pueden descomponer.
A estas partículas se les llama **átomos** (palabra de origen griego que quiere decir "indivisible").
La molécula de los **cuerpos simples** está formada por átomos **idénticos** (generalmente comprende dos). Las moléculas de los **cuerpos compuestos** están formadas por asociación de átomos pertenecientes a **especies diferentes.**

Interpretación de las leyes químicas. — Las leyes de la química se interpretan en la teoría atómica con la mayor sencillez.

La constancia de la composición de una especie química dada, como el gas amoníaco *(ley de Proust)*, resulta de la identidad de la constitución de todas sus moléculas, formadas por un átomo de nitrógeno y tres de hidrógeno.
El anhídrido carbónico contiene dos veces más de oxígeno combinado con un mismo peso de carbono que el óxido de carbono *(ley de Dalton)*, porque su molécula encierra dos átomos de oxígeno mientras que la del óxido de carbono contiene solamente uno.
La noción de **número proporcional** que se deriva de las leyes de Dalton y de las Richter se funda en la masa atómica constante para cada elemento.
Las **transformaciones químicas** (descomposiciones, reacciones, combinaciones) resultan de las escisiones de las moléculas, de las asociaciones de los átomos, etc., que dan lugar a nuevos edificios moleculares realizados a expensas de los iniciales, que desaparecen.
Finalmente, el número y la naturaleza de los átomos que intervienen en todos estos fenómenos permanecen invariables *(ley de Lavoisier*, conservación de los elementos).
Más adelante daremos la interpretación de las *leyes de Gay-Lussac.*

Fórmulas químicas. — Las fórmulas químicas son unos esquemas que representan en forma abreviada, en la teoría atómica, los constituyentes de las moléculas de los diferentes compuestos.
Se ha convenido en atribuir al átomo de cada cuerpo simple un **símbolo** formado por una letra mayúscula (en general la inicial del nombre del elemento), a la que, en caso de ambigüedad, se añade una letra minúscula. (V. la tabla **alfabética de los diferentes elementos,** con los símbolos correspondientes, pág. 244.)
Nos limitaremos a citar aquí unos cuantos: hidrógeno, H; oxígeno, O; nitrógeno, N; cloro, Cl; azufre, S; carbono, C; sodio, Na; potasio, K; calcio, Ca, etc.
Se escribe la fórmula inscribiendo sucesivamente los símbolos de las diferentes especies de átomos contenidos en la molécula. Un número entero situado a la derecha del símbolo (hacia abajo como un índice), precisa el número de átomos de la especie correspondiente cuando dicho número es mayor que 1.

Ejemplos de fórmulas. — Se atribuye al gas amoníaco la fórmula NH_3 para expresar que su molécula contiene 1 átomo de nitrógeno por 3 de hidrógeno. Las fórmulas respectivas del anhídrido carbónico y del óxido de carbono son CO_2 y CO. El clorato potásico se formula ClO_3K: su molécula está compuesta por un átomo de cloro, 3 de oxígeno y uno de potasio.

Sistema de las masas atómicas

Sistemas de las masas atómicas: Masas reales de los átomos y masas atómicas. Átomos-gramo. Número de Avogadro. Determinación de las masas atómicas. Masa atómica del oxígeno. Isomorfismo. Ley de Mitscherlich. Ley de Dulong y Petit. Masa atómica de los cuerpos gaseosos. Determinación precisa de las masas atómicas. O = 16, base actual del sistema de las masas atómicas. Importancia de la noción de masa atómica. **Masas moleculares:** Masas reales de las moléculas y masas moleculares. Moléculas-gramo. Masas moleculares y densidades de los gases. Ley de Avogadro. La ley de Avogadro deducida de las leyes de Gay-Lussac. La ley de Avogadro y el coeficiente de dilatación de los gases. Volumen molecular. Volumen atómico. Determinación de las masas moleculares por las densidades de vapor. Otros métodos de determinación de las masas moleculares. Leyes de Raoult. Crioscopia. Ebulloscopia. La ley de Raoult y los electrólitos. Precisión de las medidas de las masas moleculares

Sistema de las masas atómicas

Masas reales de los átomos y masas atómicas. — Los átomos son extraordinariamente pequeños; tanto es así que sus masas reales han permanecido largo tiempo inaccesibles a toda medida.

Sin embargo, desde hace ya muchos años, los químicos han logrado establecer un sistema de *números proporcionales* (v. pág. 240) *cuya relación es la misma que la de las masas reales de los átomos:* se trata del **sistema de las masas atómicas,** fundado sobre los principios siguientes:

Se atribuye a la masa atómica del *hidrógeno* el valor 1. Si, sobre esta base, se elige el valor 14 para la masa atómica del nitrógeno, es porque se admite que el átomo real de nitrógeno es 14 veces más pesado que el átomo de hidrógeno.

La masa atómica de un elemento representa la relación que existe entre la masa real del átomo correspondiente y la masa real de un átomo de hidrógeno.

Atomos-gramo. Número de Avogadro. — Si la masa atómica del hidrógeno es 1, la masa de 1 g de hidrógeno representa lo que se llama un *átomo-gramo* de dicho elemento.

Por lo tanto, 1 *átomo-gramo* de nitrógeno pesará 14 g.

Se llama número de Avogadro N el número de *átomos reales* contenidos en 1 g, es decir, en un átomo-gramo de hidrógeno. Naturalmente, 14 g de nitrógeno contendrán el mismo número N de átomos de nitrógeno.

Se deduce claramente que **para obtener la masa real de un átomo, basta dividir la masa del átomo-gramo por el número de Avogadro.** Esta masa representa una fracción ínfima de gramo.

Mucho después de haber establecido el sistema de las masas atómicas y por métodos muy diferentes, se ha logrado determinar el número de Avogadro cuyo valor es $6{,}02 \times 10^{23}$, lo que representa un poco más que un 6 seguido por 23 ceros, o sea más de 602 000 trillones de átomos.

Si consideramos que desde el nacimiento de Jesucristo han transcurrido aproximadamente 60 000 millones de segundos, o sea un 6 seguido de 10 ceros, se puede apreciar el valor enorme del número de Avogadro.

Determinación de las masas atómicas. — Gracias a las hipótesis sobre la constitución de las moléculas, se ha podido dar solución a la indeterminación que pesa sobre todo sistema de números proporcionales.

Un ejemplo nos hará comprender cómo ha sido posible resolver este problema.

Masa atómica del oxígeno. — El valor 16 (exactamente 15,92) de la masa atómica del oxígeno se deduce de la fórmula H_2O, atribuida al agua, así como de la composición centesimal de ésta.

En efecto, la fórmula H_2O indica que la molécula contiene 2 átomos de hidrógeno por 1 de oxígeno. Por otra parte, el agua contiene en peso 8 veces más de oxígeno que de hidrógeno. De esto se deduce que un átomo de oxígeno pesa 8 veces más que 2 átomos de hidrógeno y, por lo tanto, 16 veces más que uno solo. Por consiguiente, la masa atómica del oxígeno es 16, lo que se expresa escribiendo O = 16.

Justifiquemos ahora la elección de la fórmula H_2O.

Si se hace reaccionar el agua con un metal muy oxidable, como el sodio, éste expulsa la *mitad* del hidrógeno contenido en el agua y forma una combinación (sosa) que comprende la totalidad del oxígeno y la otra mitad del hidrógeno.

Puesto que cabe la posibilidad de eliminar la mitad del hidrógeno, es lógico admitir que *cada molécula de agua contiene dos átomos de hidrógeno*. Por otra parte, nunca se ha podido comprobar la eliminación del oxígeno por fracciones. Por lo tanto, no pueden corresponder al agua fórmulas del tipo H_2O_2, H_2O_3, etc.

Isomorfismo. Ley de Mitscherlich. — La consideración de isomorfismo ha jugado un papel considerable en la química, pues ha permitido *prever la fórmula de numerosos compuestos* y determinar, a partir de ésta, el valor de la *masa atómica de cierto número de elementos*.

Se dice que dos cuerpos son **isomorfos** cuando están constituidos por **cristales** que pertenecen al mismo sistema cristalino y cuyos ángulos diedros son prácticamente semejantes (v. GEOLOGÍA, p. 284 y sig., vol. V).

Además, los cuerpos isomorfos no pueden ser separados por cristalización fraccionada (v. pág. 238). Cuando se deja cristalizar la solución que contiene la mezcla de dichos cuerpos, las especies químicas, en vez de formar cristales distintos, se mezclan en una proporción cualquiera en el seno de los cristales. Se dice entonces que sincristalizan.

La **sincristalización** caracteriza el isomorfismo.

Mitscherlich ha enunciado la ley siguiente:

Los cuerpos isomorfos tienen fórmulas químicas semejantes.

El *arseniato sódico* es isomorfo del fosfato sódico PO_4HNa_2, y le corresponderá, por lo tanto, la fórmula AsO_4HNa_2, lo que permite determinar el valor As = 75 de la masa atómica del arsénico.

Ley de Dulong y Petit. — Dulong y Petit (v. FÍSICA, pág. 40) observaron que multiplicando la masa atómica correspondiente por el calor específico de numerosos *cuerpos simples, considerados en estado sólido*, se obtenía un número de calorías de 6,4 aproximadamente.

Esta observación, elevada al rango de *ley general aproximada*, ha permitido en ciertos casos resolver la *indeterminación* que pesa sobre la elección de las masas atómicas.

Así, entre los valores 31,5 y 63 aceptables para la masa atómica del *cobre*, se escogerá el valor 63, que multiplicado por el calor específico 0,095 del metal en estado sólido da el producto 6,1 próximo de 6,4.

Masa atómica de los cuerpos gaseosos. — Las masas atómicas de los cuerpos simples gaseosos, oxígeno, nitrógeno, cloro, etc., pueden ser deducidas de las medidas de las densidades relativas de dichos gases con respecto al aire.

Determinación precisa de las masas atómicas. — El análisis y la síntesis químicos constituyen los métodos más precisos para la determinación de las masas atómicas.

En cada caso, se elige de manera racional la combinación que permita proceder en las mejores condiciones a las medidas exactas de la composición.

Sin entrar en los detalles experimentales de los interesantes trabajos realizados para conseguir estas determinaciones, nos limitaremos a indicar que el *agua* ha servido de base para la evaluación de la masa atómica del *oxígeno*, el *óxido nítrico*, NO, para la de la masa atómica del *nitrógeno*, el *anhídrido carbónico*, CO_2, y para la de la masa atómica del *carbono*.

Las masas atómicas de la *plata*, el *cloro* y el *potasio* han sido deducidas del análisis de las combinaciones siguientes: *cloruro potásico*, ClK; *clorato potásico*, ClO_3K; *cloruro de plata*, ClAg; en este caso, se había obtenido el cloruro de plata a partir de un peso conocido de plata pura.

Las leyes de Mitscherlich, de Dulong y Petit y otras permiten resolver a continuación la indeterminación que subsiste después del análisis.

La determinación cada vez más precisa de las masas atómicas sigue siendo objeto de numerosos trabajos de laboratorio.

De esta manera, la tabla de los valores de las masas atómicas se rectifica en consecuencia cada año. Incluimos esta tabla en la página 524.

O = 16, base actual del sistema de las masas atómicas. — Las combinaciones que sirven de base para la determinación precisa de las masas atómicas son sobre todo las **oxigenadas,** más numerosas que las **hidrogenadas.**

Por lo tanto, se mide, en estas combinaciones, la relación existente entre la masa del átomo estudiado y la masa del átomo de *oxígeno*.

Para obtener la masa atómica del elemento, es necesario multiplicar esta relación por la masa atómica del oxígeno, O = 15,92.

En estas condiciones, la mayor parte de los valores de las masas atómicas deberán ser rectificados ligeramente *cada vez que un método más preciso modifique el valor de la masa atómica del oxígeno.* Para evitar este inconveniente, los químicos se han puesto de acuerdo para adoptar el valor O = 16 como base arbitraria de las masas atómicas, renunciando a la base H = 1.

Así, la masa atómica del hidrógeno es H = 1,008.

Para los cálculos prácticos, en general se "redondea" el valor de las masas atómicas, adoptándose el número entero correspondiente, de manera que **el cambio de base no ejerce efecto alguno sensible sobre los resultados.**

Importancia de la noción de masa atómica. — La noción de masa atómica ha presentado un interés capital en el desarrollo de la ciencia. El **orden** en que se suceden los elementos según sus masas atómicas crecientes ha constituido la base de una clasificación racional de los mismos. (V. pág. 249, y FÍSICA, pág. 162.)

Masas moleculares

Masas reales de las moléculas y masas moleculares. — La **masa real** de la **molécula** de un cuerpo es igual a la suma de las masas de los átomos que la constituyen. Esta masa representa una fracción extremamente pequeña de miligramo.

Se llama **masa molecular** de un cuerpo el número obtenido sumando las masas atómicas de los elementos que encierra, estando cada uno de éstos multiplicado por el coeficiente que figure en la fórmula.

Así, la masa molecular del agua, H_2O, es igual a $1 \times 2 + 16 = 18$.

Moléculas-gramo. — Ya hemos dicho antes qué es lo que se entiende por 1 átomo-gramo de un *cuerpo simple*. Definiremos de manera análoga la *molécula-gramo*, o *mol*, de un *cuerpo compuesto:* es una masa de este cuerpo expresada en gramos por el mismo número que representa la masa molecular. Una molécula-gramo de agua representa 18 gramos de agua; una molécula-gramo de anhídrido carbónico, 44 gramos de dicho cuerpo.

La masa real de la molécula es igual a la masa molecular (molécula-gramo) dividida por el número N de Avogadro. La masa molecular M del anhídrido carbónico, CO_2, es

$$M = 12 + 2 \times 16.$$

Dividamos por N los dos miembros de esta igualdad. Resulta

$$\frac{M}{N} = \frac{12}{N} + 2 \times \frac{16}{N}.$$

Ahora bien, $\frac{12}{N}$ representa la masa real de un átomo de carbono; $\frac{16}{N}$, la masa real de un átomo de oxígeno, expresadas ambas en una fracción de gramo. El segundo miembro representa la masa real de la molécula de anhídrido carbónico, que es igual a $\frac{M}{N}$.

La masa molecular es sensiblemente igual a la relación entre la masa real de la molécula y la masa real del átomo de hidrógeno.

Cuando se dice que la masa molecular del agua es 18, se expresa que la molécula de agua pesa 18 veces más que el átomo de hidrógeno.

Masas moleculares y densidades de los gases. — La medida de las *densidades* de los **cuerpos simples** *gaseosos con respecto al hidrógeno* muestra que los valores se expresan exactamente por *los mismos números que las masas atómicas*.

Así, el oxígeno (O = 16) es 16 veces más pesado que el hidrógeno; el nitrógeno (N = 14), 14 veces más pesado; el cloro (Cl = 35,5), 35,5 veces más pesado, etc.

Por consiguiente, hay que admitir que *en un mismo volumen* de hidrógeno, de oxígeno, de nitrógeno, de cloro, en estado gaseoso, *existe el mismo número de moléculas* de cada uno de dichos cuerpos.

Examinemos ahora lo que ocurre con los **cuerpos compuestos** en estado gaseoso.

El gas amoniaco, NH_3, de masa molecular 17, demuestra ser solamente 8,5 ó $\frac{17}{2}$ veces más pesado que el hidrógeno. El vapor de agua pesa sólo 9 veces más que el hidrógeno, mientras que la masa molecular del agua es 18, etc.

Existe, pues, en lo que respecta a las *combinaciones*, consideradas en estado gaseoso, una anomalía aparente, que desaparece al formular la hipótesis siguiente:

La molécula del hidrógeno y de los cuerpos simples gaseosos contiene dos átomos.

En efecto, la fórmula del gas hidrógeno es entonces H_2. La masa molecular de dicho gas es 2, y la relación entre las masas moleculares del gas amoniaco y del vapor de agua es $\frac{17}{2} = 8{,}5$, valor que corresponde a la densidad del gas amoniaco con respecto al hidrógeno. En vista de los resultados obtenidos más arriba, hay que admitir que si la molécula de hidrógeno encierra dos átomos, otro tanto sucede con la de oxígeno, nitrógeno y cloro, cuyas moléculas deben formularse O_2, N_2, Cl_2.

Más adelante justificaremos esta hipótesis.

Ley de Avogadro. — Estas consideraciones nos conducen a la ley de Avogadro (1811), que puede enunciarse así:

En las mismas condiciones de temperatura y de presión, dos volúmenes iguales de cuerpos cualesquiera, simples o compuestos, gaseosos o en estado de vapor, contienen siempre el mismo número de moléculas.

La ley de Avogadro deducida de las leyes de Gay-Lussac. — Se puede deducir esta ley, así como la estructura diatómica de la molécula de los cuerpos simples, del comportamiento de los gases capaces de reaccionar entre sí.

La experiencia muestra que 1 litro de cloro se combina exactamente con 1 litro de hidrógeno para formar ácido clorhídrico, ClH.

Puesto que después de la reacción no queda residuo alguno de cloro o de hidrógeno, hay que admitir que 1 litro de cloro contiene el mismo número de moléculas que 1 litro de hidrógeno (ley de Avogadro).

Por otra parte, la reacción muestra además que se obtienen 2 litros de ácido clorhídrico gaseoso (y no 1 litro). Por lo tanto, hay que admitir que el número de moléculas de ácido clorhídrico gaseoso formado es dos veces mayor que el de moléculas de cloro o de hidrógeno. Este hecho se concibe únicamente si la molécula de hidrógeno contiene dos átomos de hidrógeno y la de cloro dos átomos de cloro.

La ley de Avogadro y el coeficiente de dilatación de los gases. — Para asimilar bien el espíritu de la ley de Avogadro, es preciso recordar que, en un volumen gaseoso, el *espacio vacío es considerable* si se le compara con el que *ocupa la materia*. Así, 1 litro de vapor de agua, que pesa 0,8 g, se transforma en 0,8 cm^3 cuando la materia se condensa en estado líquido, y este mismo volumen es aún considerable si se le compara con el que ocupan las moléculas. Prácticamente, las moléculas son unas partículas de dimensión despreciable. En estas condiciones, la ley de Avogadro expresa que la *distancia media entre las moléculas es la misma en todos los gases*, cuando se consideran en las mismas condiciones de temperatura y de presión.

Así se explica que el coeficiente de dilatación $\frac{1}{273}$ sea el mismo para todos los gases.

Volumen molecular. — Se llama **volumen molecular** el volumen que ocupa a 0° C y a la presión de 760 mm de mercurio una molécula-gramo de un cuerpo cualquiera en estado gaseoso, o *supuesto gaseoso* en las condiciones consideradas. En virtud de la ley de Avogadro, el volumen molecular de todos los cuerpos, simples o compuestos, es el mismo. En particular, es igual al volumen ocupado por 2 g de hidrógeno (hablando con toda propiedad, por 1,008 × 2 g o 2,016 g, si se toma O = 16 como base de las masas atómicas).

Este volumen es igual a $\frac{2 \times 14{,}4}{1{,}293} = 22{,}4$ litros.

14,4 es la inversa de la densidad del hidrógeno con respecto al aire, y 1,293 representa la masa de un litro de aire en gramos.

Volumen atómico. — El **volumen atómico,** que afecta solamente a los cuerpos *simples* gaseosos, es el volumen ocupado por un átomo-gramo de un cuerpo simple en estado gaseoso, considerado en las condiciones normales. En los gases cuyas moléculas son diatómicas, es exactamente la mitad del volumen molecular.

En este caso, el volumen atómico vale 11,2 litros.

Determinación de las masas moleculares por las densidades de vapor. — Se puede deducir la masa molecular de un cuerpo determinando su densidad de vapor, d_H, con respecto al hidrógeno.

Puesto que la masa molecular del hidrógeno es 2, la masa molecular M de la substancia considerada viene dada por la ecuación

$$M = 2d_H.$$

Generalmente, las densidades de los gases o de los vapores se miden con respecto al aire. El vapor d_{aire} así hallado, multiplicado por la inversa $\frac{1}{0{,}0694} = 14{,}4$ de la densidad del hidrógeno con respecto al aire, da la densidad del valor con respecto al hidrógeno, es decir, la masa molecular de la substancia:

$$M = 2 \times 14{,}4 \times d_{aire},$$
$$M = 28{,}8\, d_{aire}.$$

La masa molecular de un cuerpo gaseoso o volátil se obtiene multiplicando por 28,8 la densidad del gas o del vapor con respecto al aire.

La determinación de las densidades de los cuerpos simples gaseosos ha permitido precisar el valor de las masas atómicas correspondientes.

Otros métodos de determinación de las masas moleculares. Leyes de Raoult. — Las propiedades de las soluciones han conducido al físico Raoult a proponer otros métodos de determinación de las masas moleculares sobre las substancias disueltas. Los dos más empleados llevan los nombres de **crioscopia** y **ebulloscopia** (v. FÍSICA, pág. 53).

Crioscopia. — Cuando se enfría una solución *diluida* de un cuerpo puro por estudiar en un solvente adecuado, se comprueba que la congelación *comienza* a efectuarse a una temperatura *inferior* al punto de congelación del solvente puro.

Raoult ha demostrado que, en todas las soluciones diluidas, la disminución $\triangle t$ del punto de congelación es proporcional al *número de moléculas reales* del cuerpo disueltas en 100 g de solución.

Naturalmente, esta cantidad es proporcional a la masa c del cuerpo disuelto e inversamente proporcional a su masa molecular M. Se obtiene así la igualdad

$$\triangle t = k \frac{c}{100\ M}.$$

El factor k, llamado *constante crioscópica*, depende exclusivamente de la naturaleza del solvente.

Los solventes empleados con mayor frecuencia para efectuar las crioscopias son el agua, el ácido acético, el benceno, el nitrobenceno, el fenol, etc.

Los solventes crioscópicos deben haber sido purificados meticulosamente antes de su empleo.

Ebulloscopia. — Cuando se hace hervir una solución *diluida* de un cuerpo puro en un solvente, se observa que el punto en que *comienza* la ebullición es *superior* al del solvente puro.

La elevación $\triangle t$ del punto de ebullición obedece a una ley,

$$\triangle t = k' \frac{c}{100\ M},$$

exactamente calcada de la ley de crioscopia.

El factor k', llamado *constante ebulloscópica*, depende de la naturaleza del solvente empleado.

El método ebulloscópico, menos preciso que el crioscópico, se emplea menos.

La ley de Raoult y los electrólitos. — Los *electrólitos en solución acuosa* presentan, con respecto a las leyes de Raoult, ciertas anomalías, por lo que los métodos crioscópicos y ebulloscópicos no les pueden ser aplicados sin modificaciones.

Precisión de las medidas de las masas moleculares. — Los métodos arriba descritos ofrecen una precisión limitada en la determinación de las masas moleculares; sin embargo, son muy útiles cuando se trata de fijar el *orden de magnitud* en los casos de cuerpos en los que se vacila entre una fórmula y un múltiplo o submúltiplo de la misma (v. QUÍMICA ORGÁNICA, pág. 313).

Las masas moleculares exactas se calculan a partir de las masas atómicas de los elementos.

Nomenclatura de los cuerpos simples

No se ha seguido una norma fija en la elección de los nombres de los 102 cuerpos simples actualmente identificados.

Los conocidos desde épocas antiguas (hierro, cobre, cinc, plomo, oro, etcétera) han conservado en la lengua española sus nombres comunes; en cuanto a los demás, han recibido generalmente una denominación que recuerda el nombre de los químicos que los han descubierto. Ciertas apelaciones se derivan etimológicamente de los nombres de las substancias comunes (*sodio*, de sosa, *calcio*, de cal; *aluminio*, de alúmina, etcétera), o bien son el reflejo de ciertas propiedades físicas (*cloro*, del gr. *cloros*, verdoso; *yodo*, de *iodes*, violeta) o químicas: *hidrógeno* significa que engendra el agua; *oxígeno*, que engendra los ácidos.

En general, los **símbolos** atribuidos a cada elemento se deducen fácilmente de los nombres castellanos. Algunos: Sb (antimonio) de *stibium*, Sn (estaño) de *stannum*, se derivan del latín. Hg (mercurio) procede del griego *hidrargiros*. Los símbolos K (potasio) de *kalium*, y Na (sodio) de *natrium*, son de origen árabe.

Clasificación somera de los cuerpos simples. — Más adelante damos una clasificación racional de los elementos. Nos limitaremos a indicar aquí cómo se les puede agrupar, en una primera aproximación.

Se distinguen tres grupos de cuerpos simples:

1° Los **metales,** que poseen un brillo particular (brillo metálico).

Son buenos conductores del calor y de la electricidad. A la temperatura ordinaria, son todos sólidos, excepto el mercurio. Se les puede laminar (maleabilidad) y estirar en hilos (ductilidad).

Los metales se unen entre sí formando **aleaciones** a veces muy complejas que, generalmente, constituyen asociaciones de naturaleza puramente física más bien que combinaciones;

2º Los **metaloides,** que, en estado sólido, no poseen generalmente brillo metálico y son quebradizos. Entre ellos se cuentan, además de los sólidos, un líquido, el bromo, y varios gases (hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, cloro, flúor). Son malos conductores del calor y de la electricidad. Al combinarse entre sí o con los metales, los metaloides forman todas las combinaciones de la química.

La frontera entre los metales y los metaloides no es perfectamente neta. Generalmente, son considerados como metaloides:

a) El *hidrógeno* H;

b) El *flúor* F, el *cloro* Cl, el *bromo* Br, el *yodo* I, cuyo átomo se combina con *un* átomo de hidrógeno;

c) El *oxígeno* O, el *azufre* S, el *selenio* Se, el *telurio* Te, cuyo átomo puede fijar *dos* átomos de hidrógeno;

d) El *nitrógeno* N, el *fósforo* P, el *arsénico* As, el *antimonio* Sb, que se unen a tres átomos de hidrógeno así como el *boro* B;

e) El *carbono* C, el *silicio* Si, que forman con el hidrógeno las combinaciones CH_4, SiH_4;

3º Los **gases nobles** o **gases raros,** cuyo descubrimiento es relativamente reciente, contenidos en el aire en cantidades variables, aunque siempre pequeñas. Comprenden:

El *helio*, He, el *neón* Ne, el *argón* A, el *kriptón* Kr, el *xenón* Xe y, en fin, el *radón* Rn, que se forma en la desintegración del radio.

Estos cuerpos son absolutamente inertes desde el punto de vista químico, y no se conoce de ellos combinación alguna. *Su molécula encierra un solo átomo*, al contrario de la de los otros metaloides gaseosos.

(V. la tabla de los elementos clasificados por orden alfabético y acompañados por los símbolos y por las masas atómicas. El número inscrito al lado de la masa atómica es el número atómico. V. FÍSICA, p. 162.)

Compuestos de carbono. Química mineral. Química orgánica. — Las combinaciones originadas por la casi totalidad de los elementos contienen generalmente un número *restringido* de átomos en cada molécula. El carbono constituye una excepción, pues sus átomos pueden unirse unos con otros en número casi ilimitado, engendrando con el concurso de otros elementos (hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, etc.) combinaciones de las que han sido identificadas más de 600 000 hasta la fecha.

Esta particularidad justifica que se agrupen, con el nombre de **química orgánica,** todas las combinaciones del carbono, muchas de las cuales deben su origen a los seres vivos.

La **química mineral,** o **inorgánica,** agrupa todas las demás especies químicas, que son de origen mineral. Ciertas combinaciones del carbono (los carbonatos metálicos, el anhídrido carbónico y el óxido de carbono) se estudian con los cuerpos minerales.

TABLA DE LAS MASAS ATÓMICAS

(Unión Internacional de Química, 1953)

	SÍMBOLO	NÚMERO ATÓMICO	MASA ATÓMICA		SÍMBOLO	NÚMERO ATÓMICO	MASA ATÓMICA
Actinio	Ac	89	227	Kryptón	Kr	36	83,80
Aluminio	Al	13	26,98	Lantano	La	57	138,92
Americio	Am	95	(243)*	Litio	Li	3	6,940
Antimonio	Sb	51	121,76	Lutecio o Casiopeo	Lu	71	174.99
Argón	A	18	39,944	Magnesio	Mg	12	24,32
Arsénico	As	33	74.91	Manganeso	Mn	25	54,94
Astato	At	85	(210)	Mendelevio	Mv	101	256
Azufre	S	16	32,066**	Mercurio	Hg	80	200,61
Bario	Ba	56	137,36	Molibdeno	Mo	42	95,95
Berilio o Glucinio	Be	4	9,013	Neodimio	Nd	60	144,27
Berkelio	Bk	97	(245)	Neón	Ne	10	20,183
Bismuto	Bi	83	209	Neptunio	Np	93	(237)
Boro	B	5	10,82	Niobio o Columbio	Nb	41	92,91
Bromo	Br	35	79,916	Níquel	Ni	28	58,69
Cadmio	Cd	48	112,41	Nitrógeno	N	7	14,008
Calcio	Ca	20	40,08	Nobelio	No	102	253
Californio	Cf	98	(246)	Oro	Au	79	197,2
Carbono	C	6	12.011	Osmio	Os	76	190,2
Cerio	Ce	58	140,13	Oxígeno	O	8	16,0000
Cesio	Cs	55	132,91	Paladio	Pd	46	106,7
Cinc	Zn	30	65,38	Plata	Ag	47	107,880
Circonio	Zr	40	91,22	Platino	Pt	78	195,23
Cloro	Cl	17	35.457	Plomo	Pb	82	207,21
Cobalto	Co	27	58,94	Plutonio	Pu	94	(242)
Cobre	Cu	29	63,54	Polonio	Po	84	210
Cromo	Cr	24	52,01	Potasio	K	19	39,100
Curio	Cm	96	(243)	Prasedimio	Pr	59	140,92
Disprosio	Dy	66	162.46	Protactinio	Pa	91	231
Einstenio	E	99	253	Radio	Ra	88	226,05
Erbio	Er	68	167.2	Radón	Rn	86	222
Escandio	Sc	21	44,96	Renio	Re	75	186,31
Estaño	Sn	50	118,70	Rodio	Rh	45	102,91
Estroncio	Sr	38	87,63	Rubidio	Rb	37	85,48
Europio	Eu	63	152,0	Rutenio	Ru	44	101,1
Fermio	Fm	100	255	Samario	Sm	62	150,43
Flúor	F	9	19,00	Selenio	Se	34	78,96
Fósforo	P	15	30.975	Silicio	Si	14	28,09
Francio	Fr	87	(223)	Sodio	Na	11	22,991
Gadolinio	Gd	64	156.9	Talio	Tl	81	204,39
Galio	Ga	31	69,72	Tántalo	Ta	73	180,95
Germanio	Ge	32	72,60	Tecnecio	Tc	43	(99)
Hafnio	Hf	72	178,6	Telurio	Te	52	127,61
Helio	He	2	4.003	Terbio	Tb	65	158,93
Hidrógeno	H	1	1,008	Titanio	Ti	22	47,90
Hierro	Fe	26	55,85	Torio	Th	90	232,05
Holmio	Ho	67	164,94	Tulio	Tm	69	168,94
Ilinio o Promecio	Il	61	(145)	Uranio	U	92	238,07
Indio	In	49	114,76	Vanadio	V	23	50,95
Iridio	Ir	77	192,2	Wolframio o Tungsteno ...	W	74	183,92
Iterbio	Yb	70	173.04	Xenón	Xe	54	131,3
Itrio	Y	39	88,92	Yodo	I	53	126,91

* Cuando el valor está entre corchetes, queremos indicar que se trata de la masa del isótopo más estable conocido.

** A causa de las variaciones naturales de la abundancia relativa de sus isótopos, damos la masa atómica del azufre con una aproximación de ± 0,003.

Noción de valencia - Funciones

Noción de valencia. — El átomo de *cloro* está unido a *un* átomo de hidrógeno en la molécula de ácido clorhídrico ClH. Se dice que los elementos tales como el cloro y el hidrógeno son **monovalentes** o **univalentes.**

En cambio, el oxígeno es **divalente** o **bivalente** porque un átomo de dicho elemento se une a *dos* átomos de hidrógeno en el agua, H_2O.

El nitrógeno, **trivalente,** da una combinación hidrogenada de fórmula NH_3, el gas amoniaco.

El carbono es **tetravalente** en el compuesto CH_4. El número de átomos de hidrógeno, o de un elemento monovalente cualquiera, que puede fijar un átomo de un cuerpo simple, constituye lo que se denomina su **grado de valencia.**

Los diferentes metales son monovalentes, divalentes, trivalentes, etc. Así, el sodio, monovalente, da la combinación clorada ClNa; el cinc, divalente, da un cloruro $ZnCl_2$, mientras que el aluminio fija tres átomos de cloro en la combinación $AlCl_3$.

En una combinación, un átomo de un elemento divalente puede reemplazar a dos átomos de un elemento monovalente.

Así, el cinc puede unirse a un átomo de oxígeno para formar el óxido ZnO; el sodio, monovalente, deberá unirse a un átomo de oxígeno por medio de dos átomos a la vez para dar el óxido Na_2O. El átomo de carbono, tetravalente, se combina con dos átomos divalentes de oxígeno en el anhídrido carbónico CO_2.

La noción de valencia no es *absoluta*. Ciertos elementos pueden presentar valencias diferentes.

El hierro puede ser divalente o trivalente; el mercurio, monovalente o divalente, etc.

Radicales. — Cuando las moléculas reaccionan, se escinden en fragmentos que se agrupan luego de manera diferente para formar otras moléculas distintas. Estos fragmentos pueden estar constituidos por un átomo único, o por un grupo de átomos, que se conoce entonces con el nombre de **radical**. A veces se le llama igualmente **residuo** o **resto.**

Así, el agua tiende a escindirse en un átomo H y en un grupo o radical OH, cuando reacciona con el sodio. El radical OH se combina con un átomo de sodio para formar la sosa Na OH, mientras que dos átomos H se sueldan para formar la molécula H_2 del hidrógeno gaseoso.

Al igual que los átomos, los radicales presentan grados de valencia. El radical OH, llamado **hidroxilo,** es monovalente, puesto que está unido en el agua a un átomo de hidrógeno monovalente.

Los radicales *no existen en libertad*. Deben estar siempre formando parte de moléculas, es decir, unidos a otros átomos o radicales.

Funciones químicas. — Se ha llegado a agrupar las combinaciones, a fin de poder estudiarlas mejor.

Decimos que los cuerpos que gozan de ciertas propiedades comunes poseen una misma **función,** que queda definida, precisamente, por ese conjunto de propiedades.

Las funciones están ligadas a la presencia de un *radical*, a veces de un *átomo*, determinado, en las moléculas consideradas.

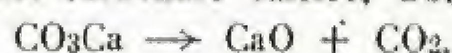
Las funciones desempeñan un papel importantísimo en química orgánica, en donde son muy numerosas.

En química mineral, las funciones **ácido, base** y **sal** presentan una importancia fundamental, y engloban la mayor parte de los cuerpos minerales. (V. más adelante.)

Ecuaciones químicas. — Se representa esquemáticamente una reacción inscribiendo las fórmulas de las moléculas que reaccionan en el primer miembro de una ecuación. En el segundo, se escriben las fórmulas de los cuerpos engendrados. En cada miembro, las moléculas de especies diferentes se separan por el signo +. Todos los coeficientes que afecten a las moléculas o a los átomos deben ser determinados de manera que *el número de átomos de cada especie sea idéntico en los dos miembros de la ecuación* (principio de la conservación de los elementos).

Los ejemplos siguientes pondrán en claro lo que acabamos de explicar.

La descomposición del carbonato cálcico, CO_3Ca, se escribe



$$CO_3Ca \longrightarrow CaO + CO_2.$$

La reacción pone solamente en juego una molécula de carbonato cálcico, y engendra una molécula de cal viva y una molécula de anhídrido carbónico. Se observa que en cada uno de los miembros figuran un átomo de carbono C, un átomo de calcio Ca y tres átomos de oxígeno O, que, en el segundo miembro, se hallan distribuidos entre la cal y el anhídrido carbónico.

El clorato potásico, ClO_3K, reacciona con el ácido clorhídrico, ClH, según la ecuación



$$ClO_3K + 6\ ClH \longrightarrow 3\ H_2O + 3\ Cl_2 + ClK.$$

En la reacción se forman agua, cloro y cloruro potásico. Como hemos partido de 3 átomos de oxígeno, los del clorato, necesitamos 6 moléculas de ácido clorhídrico que suministran el hidrógeno justamente necesario para combinarse con dicho oxígeno, dando 3 moléculas de agua. En estas condiciones, se forman 3 moléculas de cloro Cl_2. Se comprueba que en cada miembro figuran: siete átomos de cloro, tres átomos de oxígeno, un átomo de potasio y seis átomos de hidrógeno.

Observación. Hemos escrito la formación de las tres moléculas de cloro en la forma correcta, 3 Cl_2. A veces, se dejan los cuerpos simples en la forma atómica. En tal caso, se escribirá 6 Cl en vez de 3 Cl_2, dándose por supuesto, a pesar de esta manera de formular, que se sabe que la molécula de cloro es diatómica. Así, por razones de comodidad, se prefiere a veces escribir la reacción simplificada del sodio con el agua



$$Na + H_2O \longrightarrow NaOH + H$$

en vez de la ecuación correcta



$$2\ Na + 2\ H_2O \longrightarrow 2\ NaOH + H_2.$$

Cálculos realizados por medio de las fórmulas y de las ecuaciones. Problemas de química. — Las fórmulas y las ecuaciones químicas permiten resolver numerosos problemas, cuando se conoce la masa atómica de los elementos. Damos a continuación dos ejemplos de tales cálculos, que pueden ser variados hasta el infinito:

a) *Determinar la composición centesimal del clorato potásico.*

La fórmula del clorato potásico es ClO_3K. Por otra parte, sabemos que O = 16, Cl = 35,5, K = 39.

La masa molecular es igual a 35,5 + 3 × 16 + 39 = 122,5.

100 gramos de clorato potásico contienen

$$\frac{35{,}5 \times 100}{122{,}5} = 29 \text{ g de cloro}; \qquad \frac{48 \times 100}{122{,}5} = 39{,}2 \text{ g de oxígeno};$$

$$\frac{39 \times 100}{122{,}5} = 31{,}8 \text{ g de potasio.}$$

b) *En la calcinación de 80 gramos de carbonato cálcico impuro se han desprendido 13 litros de anhídrido carbónico (medidos a 0° C y a una presión de 760 mm de mercurio). ¿Qué proporción de carbonato cálcico puro contiene la muestra examinada?*

Sabemos que C = 12, O = 16, Ca = 40.

La reacción se formula



$$CO_3Ca \longrightarrow CaO + CO_2.$$

La masa molecular del carbonato cálcico es igual a 12 + 48 + 40 = = 100.

Una molécula-gramo (100 g) de carbonato puro da lugar a un volumen molecular de anhídrido carbónico, o sea 22,4 litros.

Para obtener 12 litros de este gas hay que partir de $\frac{100 \times 13}{22{,}4} = 58$ g (aproximadamente) de carbonato cálcico puro.

Por lo tanto, la proporción de carbonato puro en la muestra impura es de

$$\frac{58}{80} \times 100 = 72{,}5\ \%.$$

Bases - Ácidos - Sales

Generalidades. — En el capítulo presente, nos vamos a ocupar exclusivamente de las propiedades generales de los **compuestos minerales.**

Según el número de elementos que entran en las combinaciones, se distinguen:

Los **compuestos binarios,** como el ácido clorhídrico, HCl, la cal, CaO, el amoniaco, NH_3, etc., que contienen solamente dos elementos;

Los **compuestos ternarios,** como el carbonato cálcico, CO_3Ca, el clorato potásico, ClO_3K, la sosa, NaOH, que contienen tres;

Los **compuestos cuaternarios,** como ciertas sales dobles y sales ácidas o básicas hidratadas, que contienen cuatro elementos.

Los compuestos binarios y ternarios constituyen la gran mayoría de las combinaciones. Generalmente, los ácidos, bases y sales son compuestos ternarios.

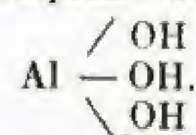
Bases

Definición. *Se llama* **base** *toda combinación ternaria compuesta por un* **átomo** *de metal unido a tantos* **radicales hidroxilo,** *OH, como grados de valencia posee.*

Al *sodio*, monovalente, corresponde la base de fórmula NaOH.

Al átomo de *calcio*, divalente, están unidos dos hidroxilos en la base $Ca(OH)_2$, que se puede formular $Ca\langle{}^{OH}_{OH}$, representando por un trazo cada valencia puesta en juego.

Al *aluminio*, trivalente, corresponde la base $Al(OH)_3$, o



Ciertos metales poseen *dos grados de valencia* diferentes y pueden originar, por lo tanto, dos bases distintas.

Así, al hierro corresponden las dos bases $Fe(OH)_2$ y $Fe(OH)_3$, en las que el metal es respectivamente divalente y trivalente.

Nomenclatura. — Las bases se designan con el nombre genérico de *hidróxidos*, que es preferible al de *hidratos*, también empleado. En cada caso particular, se pospone a esta palabra el nombre del metal correspondiente, adjetivado o no.

La base NaOH es el hidróxido sódico, vulgarmente llamado *sosa* o *sosa cáustica*.

La base $Ca(OH)_2$ es el hidróxido cálcico (cal apagada).

Cuando un metal da lugar a *varias bases*, se forma con su nombre dos adjetivos. Uno de ellos, terminado en *oso*, sirve para designar la base que contiene el menor número de hidroxilos; el otro, terminado en *ico*, designa la que contiene el mayor número de éstos. (Esta designación se aplica igualmente a las bases cuyo metal presenta un solo grado de valencia.)

La base $Fe(OH)_2$ es el *hidróxido* **ferroso.**

La base $Fe(OH)_3$ es el *hidróxido* **férrico.**

Solubilidad de las bases. — Las bases se presentan en estado sólido y son generalmente *insolubles* en el agua.

Algunas hacen excepción a esta regla, en particular:

La *sosa*, NaOH, y la *potasa*, KOH, hidróxidos de metales muy oxidables (sodio, potasio). Estas bases son muy solubles en el agua. Se les llama a veces *álcalis* cáusticos.

La *cal*, $Ca(OH)_2$, y la *barita*, $Ba(OH)_2$, hidróxidos cálcico y de bario, son mucho menos solubles.

Las bases solubles en agua coloran de azul la tintura de tornasol.

Óxidos básicos. — Los **óxidos básicos** son las combinaciones *binarias* de un metal con el oxígeno que se deriva de las bases por eliminación de agua.

Para pasar del hidróxido de un metal monovalente al óxido, hay que asociar dos moléculas. El óxido de sodio Na_2O corresponde a la base NaOH:



$$2NaOH \rightarrow Na_2O + H_2O.$$

El paso al óxido es más simple cuando se trata de un metal divalente. A la base Ca $(OH)_2$ corresponde el óxido de calcio CaO; la fórmula del óxido ferroso es FeO.

Si el metal es trivalente, hay que asociar también dos moléculas de base. La fórmula del óxido férrico, derivado del hidróxido $Fe(OH)_3$, es Fe_2O_3.

Los óxidos básicos se llaman así por la relación estrecha que los une a las bases y para distinguirlos de otras categorías de óxidos metálicos. Se les obtiene generalmente calentando los hidróxidos a una temperatura más o menos elevada. Por el contrario, los óxidos de las bases solubles fijan agua enérgicamente para transformarse en hidróxidos.

Téngase bien presente que a cada **metal** *corresponde* **por lo menos un óxido básico.**

Ácidos

Definición. *Se da el nombre de* **ácidos** *a las combinaciones* **hidrogenadas** *que, además de otras propiedades que precisaremos más adelante, poseen la facultad de* **reaccionar con las bases para dar sales y agua.**

En esta reacción, el ácido cede átomos de hidrógeno y la base el mismo número de radicales hidroxilo.

Se llama **radical ácido** *la agrupación de átomos primitivamente unida al hidrógeno en la molécula del ácido.*

La formación de agua implica necesariamente la *unión del radical ácido con el metal de la base*. El producto así formado se llama **sal.**

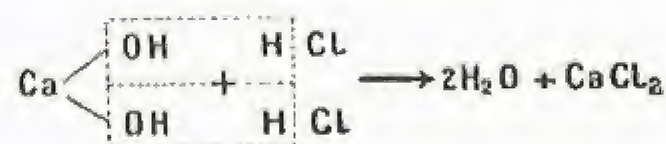
Ejemplos. El cuerpo de fórmula HCl es un ácido *(ácido clorhídrico)* formado por la unión radical Cl con un átomo de hidrógeno. Puesto en contacto con la sosa, reacciona de tal manera que el hidrógeno se une al hidroxilo y el cloro al sodio, como indica la reacción siguiente:



Otro tanto sucede con el *ácido nítrico* NO_3H, en el que el radical ácido es NO_3:



Si se reemplaza la sosa por la *cal*, que encierra dos hidroxilos, habrá que hacer intervenir dos moléculas de ácido:



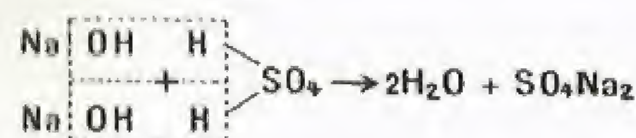
El *hidróxido férrico* requerirá tres:



Los compuestos NaCl (o ClNa), $NaNO_3$ (o NO_3Na), $(NO_3)_3Fe$, etc., son sales.

Diácidos, triácidos. — Las moléculas de ácido clorhídrico y de ácido nítrico poseen un solo átomo de hidrógeno capaz de combinarse con un hidroxilo de una base. Se les denomina **monoácidos.** Se llama **diácidos** a los ácidos cuya molécula encierra **dos átomos de hidrógeno** que gozan de esta propiedad.

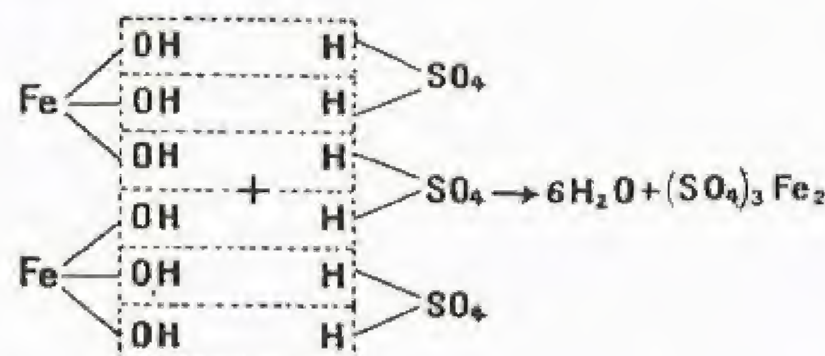
El ácido sulfúrico, SO_4H_2, es un diácido. Por lo tanto, podrá reaccionar con dos moléculas de sosa:



o bien con una sola molécula de hidróxido ferroso:



La reaccion con el hidróxido férrico requerirá la presencia de dos moléculas de base y tres de ácido:



A veces se llama también ácidos bibásicos a los diácidos, por el hecho de que reaccionan con un número doble de hidroxilos básicos.

Al lado de los diácidos, se conocen los triácidos o ácidos tribásicos tales como el ácido fosfórico, PO_4H_3, cuya acción sobre las bases es fácilmente previsible mediante razonamientos análogos a los que acabamos de exponer.

Solubilidad de los ácidos.—En general, los ácidos minerales son solubles en el agua, aunque existen excepciones tales como el ácido bórico, BO_3H_3, por ejemplo, que es muy poco soluble.

Las soluciones ácidas coloran de rojo la tintura de tornasol.

Neutralización de los ácidos y de las bases.—La reacción de un ácido con una base se realiza generalmente en medio acuoso. Cuando las masas de ambos puestas en presencia han sido *calculadas exactamente* de acuerdo con la ecuación de la reacción, se comprueba que la solución final es *neutra al tornasol:* la tintura no cambia de color cuando se vierte una gota en dicha solución. Se dice entonces que el ácido ha **neutralizado** o **saturado** la base (o bien que la base ha neutralizado o saturado el ácido).

La sal así formada en la reacción se llama **sal neutra.**

Los colorantes tales como el tornasol, que cambian de color cuando pasan de un medio a otro (ácido o básico), se llaman *indicadores coloreados*. Se les utiliza para realizar neutralizaciones exactas.

Separación de la sal neutra.—Si la sal neutra es soluble en el agua, se hallará en estado de disolución una vez terminada la reacción. Como las sales son cuerpos sólidos, se las puede extraer de la solución por evaporación del agua.

Cuando la reacción de una *base insoluble* con un ácido da lugar a la formación de una *sal soluble*, se ve desaparecer la masa sólida de la base. Se dice en tal caso que la base se **disuelve** en el ácido. Esta manera de expresarse, muy extendida, no debe prestarse a confusión: en efecto, no se trata aquí de una acción física que deje el cuerpo inalterado, sino, por el contrario, de una transformación química.

Así, el hidróxido férrico insoluble $Fe(OH)_3$ reacciona con el ácido clorhídrico (se "disuelve" en el ácido clorhídrico) para dar la sal soluble $FeCl_3$.

Por el contrario, cuando la sal originada es *insoluble*, se separa del líquido en forma de granos muy finos, diciéndose entonces que *precipita*.

Así, la reacción de la barita $Ba(OH)_2$ con una solución de ácido sulfúrico da un precipitado de sal insoluble SO_4Ba.

Acción de una cantidad insuficiente de ácido sobre una base. — Si hay un exceso de base con respecto al ácido, se forma la cantidad de sal neutra que corresponde al ácido introducido y generalmente *el exceso de base se encuentra inalterado*, a no ser que la base sea capaz de dar sales básicas.

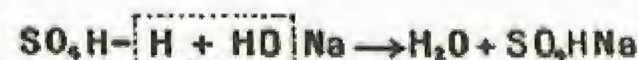
Acción de un exceso de ácido sobre una base. — Cuando se pone un exceso de ácido en contacto con la base, pueden ocurrir dos casos:

1° Si se trata de un **monoácido** se encuentra el exceso junto a la sal neutra obtenida por saturación de la base.

2° Si se trata de un **diácido** o de un **triácido,** se puede aislar, por evaporación de la solución, compuestos mixtos que son al mismo tiempo *sales* (puesto que encierran un metal) y *ácidos* (puesto que contienen hidrógeno).

Estos compuestos se denominan **sales ácidas** por oposición a las sales neutras.

Ejemplos de sales ácidas. — El ácido sulfúrico reacciona con la mitad de la cantidad de sosa necesaria para constituir la sal neutra, dando en estas condiciones la sal ácida de sodio SO_4HNa por eliminación de una sola molécula de agua. Separemos en la fórmula los dos átomos de hidrógeno del diácido. La reacción se verifica según la ecuación



El ácido fosfórico triácido, PO_4H_3, puede dar así lugar a dos sales ácidas PO_4H_2Na y PO_4HNa_2 al lado de la sal neutra PO_4Na_3. Para obtener estos diversos compuestos, basta provocar la reacción de una, dos o tres moléculas-gramo de sosa con una molécula-gramo de ácido.

Hidrácidos y oxácidos. — Los **metaloides** *monovalentes* (flúor, cloro, bromo, yodo) y los *divalentes* (azufre, etc.) dan combinaciones **hidrogenadas** tales como FH, ClH, BrH, IH, SH_2, etc., que son verdaderos **ácidos,** puesto que su hidrógeno se elimina en forma de agua al combinarse con los radicales hidroxilo de las bases.

Estos compuestos, *binarios*, se designan con el nombre genérico de **hidrácidos.**

Pero la mayor parte de los ácidos contienen **oxígeno,** constituyendo así compuestos ternarios llamados a veces **oxácidos** para diferenciarlos de los precedentes.

El cloro, que da el hidrácido ClH, puede igualmente originar varios oxácidos, tales como ClOH, ClO_3H, etc.

Anhídridos de ácidos.—Si se imagina que en la molécula de un **oxácido** se elimina la totalidad del hidrógeno en forma de agua con una parte del oxígeno contenido en ésta, se obtiene —por lo menos teóricamente— una combinación *binaria* **oxigenada** llamada **anhídrido de ácido,** o simplemente **anhídrido.**

Así, el ácido sulfúrico, SO_4H_2, corresponde al anhídrido SO_3. La formación del anhídrido N_2O_5 requiere el concurso de dos moléculas de ácido nítrico, NO_3H. Al ácido fosfórico PO_4H_3, corresponde el anhídrido P_2O_5.

La derivación de los anhídridos a partir de los oxácidos es exactamente comparable con la de los óxidos a partir de los hidróxidos.

En numerosos casos, el anhídrido reacciona espontáneamente con el agua para dar el ácido. Tal es el caso del anhídrido sulfúrico, que reacciona así:



$$SO_3 + H_2O \rightarrow SO_4H_2.$$

A veces se produce el caso inverso: el ácido carbónico, CO_3H_2, se transforma espontáneamente en el anhídrido CO_2.

Constitución de los anhídridos.—Ya hemos visto antes que a cada *metal* corresponde *por lo menos un óxido básico* y, por consiguiente, una *base*. La experiencia demuestra que a cada **metaloide** corresponde **por lo menor un óxido ácido** o **anhídrido de ácido.**

Por lo tanto, se puede decir que, como regla general, **las bases se derivan de los metales y los ácidos de los metaloides.**

Los metaloides dan a menudo varios óxidos, de los cuales no todos son necesariamente anhídridos.

EJEMPLO: el óxido de carbono CO.

Por otra parte, ciertos *óxidos metálicos* pueden reaccionar como *anhídridos*. En este caso, el *anhídrido u óxido ácido es siempre más oxigenado que el óxido básico.*

El cromo puede dar, además del óxido básico Cr_2O_3, un anhídrido CrO_3 al que corresponde un ácido CrO_4H_2, análogo al ácido sulfúrico.

Acción de un ácido sobre un óxido básico.—Un ácido reacciona con un óxido básico de igual manera que con la base correspondiente y da la misma sal.

Naturalmente, la cantidad de agua formada en la reacción es dos veces menor.

Como el hidróxido de cinc $Zn(OH)_2$, el óxido ZnO reacciona con dos moléculas de ácido clorhídrico



$$ZnO + 2HCl \rightarrow ZnCl_2 + H_2O,$$

pero al final de la reacción se ha formado solamente una molécula de agua en vez de dos.

Mientras que la reacción de los ácidos sobre las bases es fácil y casi instantánea, la reacción de los ácidos sobre los óxidos básicos es en muchos casos más difícil y puede requerir el empleo de ácidos concentrados y calientes.

Acción de un anhídrido sobre una base. — Combinados con las bases, los anhídridos dan las mismas sales que los ácidos correspondientes y forman una cantidad de agua dos veces menor.

El anhídrido carbónico CO_2, gaseoso, es *absorbido* por una solución de sosa, que lo transforma en CO_3Na_2.



$$CO_2 + 2NaOH \rightarrow CO_3Na_2 + H_2O,$$

con eliminación de una sola molécula de agua.

Óxidos salinos. — Ciertos óxidos de metales no pueden ser considerados rigurosamente ni como óxidos básicos ni como anhídridos. Es el caso del minio, Pb_3O_4, que, a juzgar por su comportamiento, debe ser catalogado como una sal verdadera formada por la unión de un óxido ácido PbO_2 y un óxido básico PbO derivados del mismo metal.

Estos cuerpos se llaman *óxidos salinos*.

Óxidos indiferentes. — El óxido de cinc ZnO, funcionando como óxido básico, conduce a la sal $ZnCl_2$ por reacción con el ácido clorhídrico. Pero el hidróxido correspondiente $Zn(OH)_2$ se "disuelve" en la sosa y da lugar al derivado $Zn(ONa)_2$, que es una sal en la que el óxido de cinc juega el papel de anhídrido.

A este tipo de óxidos, que pueden reaccionar según el caso como óxidos básicos o como óxidos ácidos, se les llama **indiferentes.** Se les conoce igualmente con el nombre de **anfóteros** (o **anfólitos**). El óxido de aluminio Al_2O_3 es también anfótero.

Nomenclatura de los ácidos (y anhídridos) y de las sales. — Los ácidos (y sus anhídridos) se designan posponiendo al nombre genérico ácido (o anhídrido) un *adjetivo* derivado del nombre del elemento que los caracteriza.

Los nombres de las sales se derivan de los de los *ácidos*. A continuación se cita el nombre del metal.

Las convenciones de la nomenclatura son las siguientes:

a) La desinencia **-hídrico** sirve para designar los **hidrácidos** o ácidos no oxigenados; la desinencia **-uro** caracteriza las **sales** correspondientes. Ej.:

Ácidos *clor***hídrico,** Hcl, *yod***hídrico,** HI, *sulf***hídrico,** H_2S, *clor***uro** ferroso, $FeCl_2$, o férrico, $FeCl_3$, *yod***uro** de plomo, PbI_2, *sulf***uro** de cinc, ZnS;

b) La desinencia **-ico** caracteriza el ácido oxigenado o el anhídrido *más corriente* formado por un elemento; el sufijo **-ato** sirve para designar las sales correspondientes. Ej.:

Ácido *sulfúr***ico,** SO_4H_2, sulfato *sód***ico,** SO_4Na_2; anhídrido *carbón***ico,** CO_2, *carbon***ato** de bario, CO_3Ba;

c) La desinencia **-oso** caracteriza un ácido o un anhídrido que, proporcionalmente, contienen menos oxígeno que el ácido en "*ico*". El sufijo **-ito** designa entonces el nombre de la sal correspondiente. Ej.:

El anhídrido *sulfur***oso,** SO_2, menos oxigenado que el anhídrido sulfúrico, SO_3, corresponde a las sales llamadas *sulf***itos** (sulfito de sodio, SO_3Na_2). El ácido *nitr***oso,** NO_2H, es menos oxigenado que el ácido nítrico, NO3H. El *nitr***ito** potásico tiene por fórmula NO_2K;

d) El prefijo **hipo-** se antepone a un calificativo terminado en **-oso** para designar un ácido o un anhídrido menos oxigenado que el ácido o el anhídrido considerado. Ej.:

El ácido **hipo***sulfur***oso,** $S_2O_3H_2$, cuyas sales son los **hipo***sulf***itos,** contiene una proporción menor de oxígeno que el ácido sulfuroso, SO_3H_2;

e) El prefijo **per-,** antepuesto a un calificativo terminado en **-ico,** sirve para designar un ácido o un anhídrido más oxigenado que el ácido o el anhídrido considerado. Ej.:

El ácido **per***sulfúr***ico,** $S_2O_8H_2$, cuyas sales son los **per***sulf***atos,** es más oxigenado que el ácido sulfúrico, SO_4H_2. La fórmula del anhídrido persulfúrico es S_2O_7, mientras que la del anhídrido sulfúrico es SO_3. (Esta denominación de ácido persulfúrico, consagrada por el uso, es en realidad menos propia que la de ácido peroxidisulfúrico.)

La tabla de los ácidos derivados del cloro resume perfectamente estas reglas de nomenclatura.

ÁCIDOS		ANHÍDRIDOS	SALES DE SODIO	
(hidrácido):				
clorhídrico	ClH	ninguno	cloruro	ClNa
(oxácidos):				
hipocloroso	ClOH	Cl_2O	hipoclorito	ClONa
cloroso	ClO_2H	Cl_2O_3	clorito	ClO_2Na
clórico	ClO_3H	Cl_2O_5	clorato	ClO_3Na
perclórico	ClO_4H	Cl_2O_7	perclorato	ClO_4Na

Propiedades accesorias de los ácidos. Definición precisa de la función. — La propiedad que tienen los ácidos de reaccionar con las bases para dar agua y sales *no es suficiente* para definir los ácidos.

En efecto, esta misma propiedad la manifiestan otros cuerpos, en particular los fenoles, que no están asimilados a los ácidos.

Por lo tanto, ha sido necesario llegar a una definición más precisa. Se conoce, pues, con el nombre de **ácido,** *todo cuerpo que, suministrando con las bases sales por eliminación de agua, se combina con los* **alcoholes** *y da origen a los* **ésteres.** En lo que respecta a los llamados **oxácidos,** tienen además la propiedad *de formar* **cloruros de ácidos** *por efecto de agentes clorurantes.*

Formación de cloruros de ácidos. — Los agentes clorurantes tales como los cloruros de fósforo, PCl_3 y PCl_5, pueden eliminar de la molécula de un oxácido uno o varios radicales hidroxilo OH, reemplazándolos por uno o varios átomos de cloro.

El ácido se transforma así en **cloruro de ácido.**

El ácido nítrico da el cloruro de nitrilo, NO_2Cl.

El ácido sulfúrico, que es un diácido, puede dar lugar a dos cloruros, SO_3HCl y SO_2Cl_2.

Los cloruros de ácidos, generalmente poco estables, reaccionan con el agua y regeneran el ácido con desprendimiento de ácido clorhídrico gaseoso



$$NO_2Cl + H_2O \rightarrow NO_3H + HCl.$$

Ésta es la razón por la que humean al ponerse en contacto con el aire.

Acción de los ácidos sobre los metales. — En muchos casos, los ácidos reaccionan con los metales dando lugar a la sal correspondiente por desplazamiento de hidrógeno, que pasa a ser substituido por el metal.

Es bien conocida la reacción clásica del hierro sobre el ácido clorhídrico



$$Fe + 2HCl \rightarrow FeCl_2 + H_2.$$

El hidrógeno, desplazado por el metal, *se desprende aquí en estado gaseoso*. En otros casos, este hidrógeno naciente es capaz de reducir los oxácidos (v. ÁCIDO NÍTRICO, p. 276).

OBSERVACIÓN. *Esta facultad de reaccionar con los metales, dando hidrógeno naciente, no es exclusiva de los ácidos.* Así, el *agua* reacciona con el sodio, en frío



$$2\ Na + 2\ H_2O \rightarrow 2NaOH + H_2,$$

y con el hierro, en caliente



$$3\ Fe + 4H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 4H_2,$$

desprendiendo hidrógeno.

Los *álcalis* reaccionan con el cinc y forman un *cincato* (ya hemos visto que el óxido de cinc es anfótero):



$$Zn + 2NaOH \rightarrow Zn(ONa)_2 + H_2.$$

Generalización de la noción de ácido y de base (teoría de Brönsted. — Basándose en la teoría de los iones (v. Electrólisis, abajo), Brönsted ha definido un ácido como un compuesto capaz de ceder iones H^+. Según esto, entre un ácido y una base existe la relación siguiente:



$$AH \Longleftrightarrow A^- + H^+$$

Sales

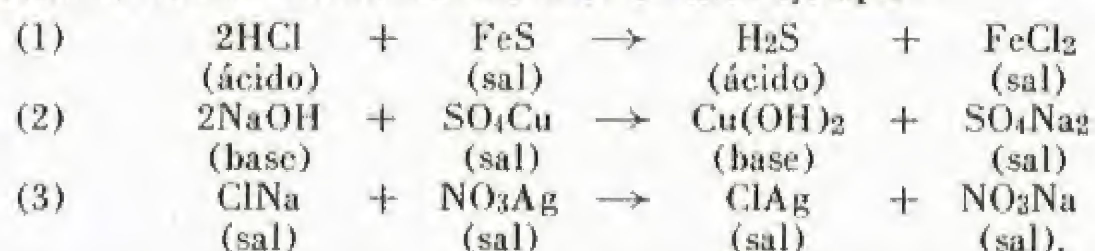
Definición. Ya hemos visto cómo se forman las **sales** por acción de los ácidos (o anhídridos) sobre las bases (u óxidos) o por acción de los ácidos sobre los metales.

Resultan al substituir el hidrógeno en las moléculas de los ácidos por un metal.

Se llama *equivalente* o *valencia-gramo* de un metal la masa de dicho metal capaz de reemplazar 1 gramo de hidrógeno (exactamente 1,008 g). El equivalente es igual al cociente de la masa atómica por la valencia.

Reacciones de un ácido, de una base, de una sal, sobre una sal. — Cuando se provoca la reacción de un ácido, una base o una sal dada, puede tener lugar la substitución del metal de dicha sal por el hidrógeno del ácido o bien por el metal de la base o de la otra sal.

Una reacción de este tipo se conoce con el nombre de *doble descomposición.* Damos a continuación unos cuantos ejemplos:



(1)	$2HCl$ (ácido)	+	FeS (sal)	$\rightarrow$	H_2S (ácido)	+	$FeCl_2$ (sal)
(2)	$2NaOH$ (base)	+	SO_4Cu (sal)	$\rightarrow$	$Cu(OH)_2$ (base)	+	SO_4Na_2 (sal)
(3)	$ClNa$ (sal)	+	NO_3Ag (sal)	$\rightarrow$	$ClAg$ (sal)	+	NO_3Na (sal).

Se ve que en estas reacciones los *cuerpos originados tienen las mismas funciones químicas que los cuerpos iniciales.*

Reglas de Berthollet. — Las dobles descomposiciones a partir de una sal *no se producen necesariamente.* Las reglas de Berthollet precisan las condiciones en las que pueden tener lugar.

Regla I. Para que pueda tener lugar *una doble descomposición entre una* **sal,** *por una parte, y un ácido, una base o una sal, por otra, es preciso que por lo menos uno de los dos compuestos que son susceptibles de formarse sea* **volátil** *en las condiciones de la experiencia.*

Regla II. *La doble descomposición es igualmente posible cuando por lo menos uno de los dos compuestos previstos es* **insoluble.**

La reacción (1) del ácido clorhídrico sobre el sulfuro de hierro artificial es posible gracias a la *volatilidad* del ácido sulfhídrico, H_2S, que se desprende en forma de gas.

La reacción (2) de la sosa en solución sobre el sulfato de cobre disuelto es posible gracias a la *insolubilidad* de la base $Cu(OH)_2$ (hidróxido de cobre), que *precipita* en el seno del líquido.

La reacción (3) del cloruro sódico sobre el nitrato de plata se realiza porque el cloruro de plata, $AgCl$, es *insoluble* y precipita.

Observación. Sucede a veces que, en una doble descomposición, los dos cuerpos formados son insolubles. Así, el sulfato de plata y el cloruro de bario *disueltos* dan, por doble descomposición, una mezcla de sulfato de bario y de cloruro de plata insolubles:



$$SO_4Ag_2 + Cl_2Ba \rightarrow SO_4Ba + 2ClAg.$$

Las reglas de Berthollet hallan una aplicación práctica en la preparación de los ácidos y las bases.

Métodos generales de obtención de los ácidos. — Se puede obtener un ácido volátil haciendo reaccionar un ácido más fijo con una de sus sales.

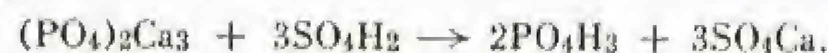
Este método se emplea para obtener los ácidos clorhídrico y nítrico por acción del ácido sulfúrico sobre el cloruro o el nitrato sódico: el ácido obtenido se destila calentándolo.

El anhídrido carbónico gaseoso CO_2 se obtiene por acción de un ácido cualquiera sobre un carbonato:



$$CO_3Ca + 2HCl \rightarrow CO_2 + H_2O + Cl_2Ca.$$

El ácido fosfórico, soluble y fijo, se puede obtener por acción del ácido sulfúrico sobre el fosfato cálcico *gracias a la insolubilidad del sulfato cálcico:*



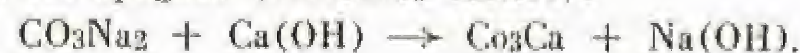
$$(PO_4)_2Ca_3 + 3SO_4H_2 \rightarrow 2PO_4H_3 + 3SO_4Ca.$$

Se filtra la solución y se concentra el ácido fosfórico separado del sulfato cálcico.

El método de la doble descomposición se aplica en la obtención de ácidos insolubles o poco solubles (ácido bórico).

Métodos generales de obtención de las bases. — Las bases insolubles se preparan tratando por la sosa o por la cal una sal correspondiente (v. Reacción [2] antes formulada).

En cuanto a la cal, se obtiene por calcinación de la piedra caliza. La sosa, soluble y fija, puede ser obtenida (además de por el método electrolítico) por doble descomposición entre el carbonato sódico en solución y la cal apagada (hidróxido cálcico):



$$CO_3Na_2 + Ca(OH) \rightarrow Co_3Ca + Na(OH).$$

La reacción es posible porque el carbonato cálcico es insoluble; se le separa por filtración de la solución de sosa, que se concentra.

Influencia del medio sobre las solubilidades. — Cuando se aplican las reglas de Berthollet, no basta tener en cuenta la insolubilidad *en el agua* de uno de los cuerpos formados, pues el otro compuesto, ácido, base o sal, que se origina al mismo tiempo, puede reaccionar con él y mantenerlo químicamente en solución.

Así, el fosfato cálcico $(PO_4)_2Ca_3$, *insoluble en el agua,* es *soluble en los ácidos diluidos,* por lo que no puede formarse en la reacción



$$2PO_4H_3 + 3CaCl_2 \rightarrow (PO_4)_2Ca_3 + 6HCl,$$

puesto que se disuelve en el ácido clorhídrico formado. En cambio, la reacción que tiene lugar es la inversa.

De igual manera, es imposible obtener el hidróxido de cinc cuando se hace reaccionar la sosa con el cloruro de cinc:



$$ZnCl_2 + 2NaOH \rightarrow Zn(OH)_2 + 2NaCl,$$

pero un *exceso de sosa* puede transformar el hidróxido *anfótero* en una *sal soluble*



$$Zn(OH)_2 + 2NaOH \rightarrow Zn(ONa)_2 + 2H_2O.$$

Ciertas sales insolubles en el agua pueden disolverse en determinadas bases o en otras sales, formando los compuestos que se llaman sales dobles. Así, el precipitado del cloruro de plata, $AgCl$, se disuelve en una solución amoniacal o en el cianuro potásico.

En la previsión de las reacciones, por las reglas de Berthollet, se deberá tener en cuenta la influencia del medio sobre los cuerpos formados.

Grado de generalidad de las reglas de Berthollet. — Cuenta habida de la observación arriba expuesta, las reglas de Berthollet presentan algunas excepciones. A pesar de ello, su utilidad es innegable.

En efecto, permiten retener sin gran esfuerzo de memoria la preparación de numerosos ácidos y bases, las reacciones de las sales, etc., con sólo conocer la volatilidad o la insolubilidad de los cuerpos.

Electrólisis. Teoría de los iones

Ya hemos estudiado en física (v. pág. 126) los fenómenos de electrólisis y su interpretación por la teoría de los iones, debida a **Arrhenius.** Vamos a estudiar ahora las consecuencias de esta teoría desde el punto de vista químico.

Consecuencias de la teoría de los iones. — Las propiedades de los electrólitos en solución son las de sus iones.

Los cationes H^+ de los ácidos son los responsables de que el tornasol enrojezca, y los aniones OH^-, de que azulee. La neutralización de un ácido por una base se reduce a la combinación de los iones H^+ y OH^-, que no pueden permanecer en presencia, puesto que, prácticamente, el agua no está disociada en sus iones.

La reacción



$$HCl + NaOH \rightarrow H_2O + NaCl$$

puede escribirse



$$H^+ + Cl^- + Na^+ + OH^- \rightarrow H_2O + Cl^- + Na^+.$$

Por consiguiente, los iones Cl^- y Na^+ no intervienen en la reacción.

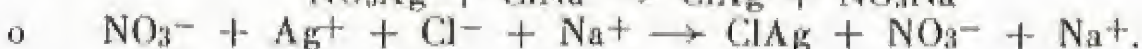
Todas las sales de cobre son azules en solución diluida, gracias a la presencia del ion Cu^{++}; los *permanganatos* deben su color violeta al anión MnO_4^-.

La teoría permite interpretar las reglas de Berthollet.

Puesto que el cloruro de plata, $AgCl$, es insoluble en el agua, no está disociado en iones; por consiguiente, los iones Ag^+ y Cl^- no pueden coexistir en solución. En estas condiciones, todos los *cloruros* solubles (que contienen el ion Cl^-) darán un precipitado de cloruro de plata con una sal soluble cualquiera de este metal, que contiene el ion Ag^+



$$NO_3Ag + ClNa \rightarrow ClAg + NO_3Na$$



o $$NO_3^- + Ag^+ + Cl^- + Na^+ \rightarrow ClAg + NO_3^- + Na^+.$$

La ley de Raoult y los electrólitos. — Ya hemos indicado anteriormente que la ley de Raoult no se aplica a las soluciones acuosas de los electrólitos.

Cuando se pretende determinar por crioscopia, en el seno del agua, la masa molecular del cloruro sódico, $NaCl$, se observa una disminución de la temperatura de congelación que corresponde casi *al doble* del valor teórico 58,5 de la masa molecular de dicha sal. Este hecho se explica sencillamente por la disociación electrolítica.

Puesto que la **disminución** de la temperatura es **proporcional al número de partículas** presentes en 100 g de solución, se deduce que si cada molécula está disociada en dos iones, el número de partículas presentes en la solución será igual al doble del número de las moléculas introducidas, lo que explica que el descenso de temperatura sea dos veces mayor.

Coeficiente de disociación electrolítica. — La disminución del punto de congelación de una solución de cloruro sódico es siempre **menor** que el doble del valor previsto para la molécula. De esta observación se infiere que no todas las moléculas están disociadas en iones y que al lado de éstos subsisten algunas moléculas intactas. Esta hipótesis se ve confirmada por el estudio de las *conductividades* de las soluciones.

Se llama **coeficiente de disociación electrolítica** *de un electrólito en solución* la relación entre el número de moléculas **disociadas** y el número total de moléculas disueltas. Dicho coeficiente es siempre menor que 1.

Este valor puede ser medido; varía de un electrólito a otro, y aumenta cuando la dilución aumenta.

De esta noción se deriva el concepto de **ácidos fuertes** o de **bases fuertes,** que están muy disociados en sus iones, por oposición a los **ácidos débiles** o a las **bases débiles,** cuya solución contiene una mayoría de moléculas no disociadas.

La disolución electrolítica es una reacción de *equilibrio* (v. EQUILIBRIOS QUÍMICOS, pág. 253) limitada por la reacción inversa, que regenera la molécula del electrólito. La disociación aumenta proporcionalmente a la dilución; puede llegar a ser total si se eliminan los iones a medida que se van formando.

Así se explica la neutralización total de los ácidos y las bases cuya disociación es en principio incompleta; en efecto, al irse eliminando progresivamente los iones H^+ y OH^-, las disociaciones del ácido y de la base se prosiguen hasta el final.

Clasificación periódica de los elementos

Clasificación periódica moderna. Ley de Moseley (1914). Disposiciones generales de la tabla. Gases nobles o gases raros. Períodos. — **Clasificación periódica de los elementos. Capas de electrones planetarios.** Interpretación de la clasificación. Estabilidad de los iones. Covalencias. Papel de los electrones planetarios. Elementos de transición

Clasificación periódica moderna. — Ya hemos visto (v. FÍSICA, pág. 162) que *Mendeleev* había propuesto, en 1869, una clasificación de los elementos, por orden de masa creciente, en una tabla en la que se ponía de relieve la periodicidad de las propiedades.

Dicha tabla ha sufrido algunos retoques; en efecto, han sido integrados los gases raros, desconocidos en la época de Mendeleev, y, por otra parte, el **de las masas atómicas** ha sido reemplazado por el **de los números atómicos,** que es más preciso. (La existencia de *isótopos* provoca a veces inversiones en la clasificación establecida teniendo en cuenta las masas atómicas.)

Es sabido que el átomo, eléctricamente neutro, está constituido por un núcleo, cargado positivamente, alrededor del cual gravitan los **electrones,** granos de electricidad negativa cuya carga es igual a $1{,}6 \times 10^{-19}$ culombios, llamados *electrones planetarios.* **El número atómico de un elemento es igual al número de electrones planetarios del átomo considerado.**

Ley de Moseley (1914). — Los espectros de emisión de rayos X de los elementos presentan unas rayas cuyas longitudes de onda varían regularmente, lo que permite atribuir a los elementos los números atómicos correspondientes. (De esta manera, se pueden justificar las inversiones.)

Numéricamente: *la raíz cuadrada de la frecuencia de una discontinuidad es proporcional al número atómico.*

Disposiciones generales de la tabla. — La tabla encierra actualmente 102 elementos. El primero es el **hidrógeno** H = 1, número atómico = 1, que es el más ligero de todos los átomos descubiertos en el universo; el último es el **uranio** U = 238, número atómico = 92, que es el más pesado.

Los elementos de número atómico 93 a 102 son *artificiales*; se les designa con el nombre de *transurarianos.*

Las **líneas horizontales** de la tabla, recorridas de izquierda a derecha, representan la serie de los elementos clasificados por orden creciente de los números atómicos.

La primera línea comprende dos elementos, el *hidrógeno* y el *helio.*

Las **columnas verticales** agrupan los elementos por *familias.* Hay ocho columnas principales que corresponden a ocho grupos numerados de 0 a VII. (Una columna anexa [grupo VIII] encierra nueve elementos dispuestos en tres líneas.) [V. tabla, abajo.]

Gases nobles o gases raros. — La primera columna de la derecha (grupo 0) contiene únicamente los gases raros del aire o gases nobles, que presentan una *inercia química absoluta.* No se conoce combinación alguna de ellos, y sus átomos no se sueldan entre sí: *la molécula es monoatómica.* La estructura de los átomos de dichos cuerpos ofrece una estabilidad perfecta.

Períodos. — *En este sistema de clasificación, se llama* **períodos** *a las series de elementos comprendidas entre dos gases nobles sucesivos.*

Los diferentes períodos son desiguales.

El 1º comprende	**2**	términos:	el hidrógeno (1) y el helio (2).
2º	—	**8**	—	del litio (3) al neón (10).
3º	—	**8**	—	del sodio (11) al argón (18).
4º	—	**18**	—	del potasio (19) al kriptón (36).
5º	—	**18**	—	del rubidio (37) al xenón (54).
6º	—	**32**	—	del cesio (55) al radón (86).

Siguen después los elementos del francio (87) al nobelio (102). Los elementos transuranianos han sido clasificados fuera de la tabla. (V. tabla, abajo.)

Los números 2, 8, 18, 32 son proporcionales a los cuadrados 1, 4, 9, 16, de los números 1, 2, 3 y 4.

CLASIFICACIÓN PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS

I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII	O
a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1 H*															2 He
3 Li		4 Be		5 B		6 C		7 N		8 O		9 F			10 Ne
11 Na		12 Mg		13 Al		14 Si		15 P		16 S		17 Cl			18 A
19 K		20 Ca		21 Sc		22 Ti		23 V		24 Cr		25 Mn		26 Fe 27 Co 28 Ni	
	29 Cu		30 Zn		31 Ga		32 Ge		33 As		34 Se		35 Br		36 Kr
37 Rb		38 Sr		39 Y		40 Zr		41 Nb		42 Mo		43 Tc		44 Ru 45 Rh 46 Pd	
	47 Ag		48 Cd		49 In		50 Sn		51 Sb		52 Te		53 I		54 Xe
55 Cs		56 Ba		57 à 71 Tierras raras		72 Hf		73 Ta		74 W		75 Re		76 Os 77 Ir 78 Pt	
	79 Au		80 Hg		81 Tl		82 Pb		83 Bi		84 Po		85 At		86 Rn
87 Fr		88 Ra		89 Ac		90 Th		91 Pa		92 U					

tierras raras	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Ne	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
transuránicos		93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 E	100 Fm	101 Mv	102 No				

El número indicado arriba en cada casilla es el número atómico.

* *En realidad, el hidrógeno debería constar aparte.*

	I	II	III	IV	V	VI	VII	O
1.er PERÍODO capa K	H 1							He 2
2.º PERÍODO capa K capa L	Li 2 1	Be 2 2	B 2 3	C 2 4	N 2 5	O 2 6	F 2 7	Ne 2 8
3.º PERÍODO capa K capa L capa M	Na 2 8 1	Mg 2 8 2	Al 2 8 3	Si 2 8 4	P 2 8 5	S 2 8 6	Cl 2 8 7	A 2 8 8
VALENCIA con respecto a *O* con respecto a *H*	1	2	3	4 4	5 3	6 2	7 1	0 0

Los electrones planetarios están distribuidos en capas (o pisos) designadas por K, L, M..., comenzando a contar a partir del núcleo

Interpretación de la clasificación. — A fin de explicar la periodicidad de las propiedades de los elementos, se admite que los electrones que gravitan alrededor del núcleo atómico están distribuidos en *capas* (o pisos) de diámetros crecientes y que las capas de los átomos de los gases raros están *saturadas*, constituyendo así unos edificios absolutamente estables.

La tabla anterior muestra la estructura de los diferentes átomos.

El *hidrógeno* presenta un electrón planetario, mientras que el *helio*, gas raro que comprende dos, ofrece una capa saturada. El elemento siguiente, el *litio*, que cuenta con un electrón más, presenta la capa saturada del helio, pero el tercer electrón describe una órbita mayor. El elemento nº 4, el *berilio*, posee dos electrones más que el helio. Ambos electrones pertenecen a la misma capa. Tras el *boro*, el *carbono*, el *nitrógeno*, el *oxígeno* y el *flúor*, que poseen respectivamente tres, cuatro, cinco, seis y siete electrones en la capa exterior, se llega a la saturación con el *neón* (elemento nº 10), gas raro cuyo átomo posee 2 + 8 electrones planetarios.

Los átomos de la tercera línea poseen 10 + 1, 10 + 2, ..., 10 + 7 electrones; la tercera capa se satura con el elemento nº 18, el argón, gas raro que posee 2 + 8 + 8 electrones planetarios.

La estructura de los átomos de la cuarta línea se deduce de igual manera a partir del átomo de argón.

Se comprueba que *en una misma columna el número de electrones de la capa periférica de los elementos es el mismo*. Estos elementos presentan propiedades análogas.

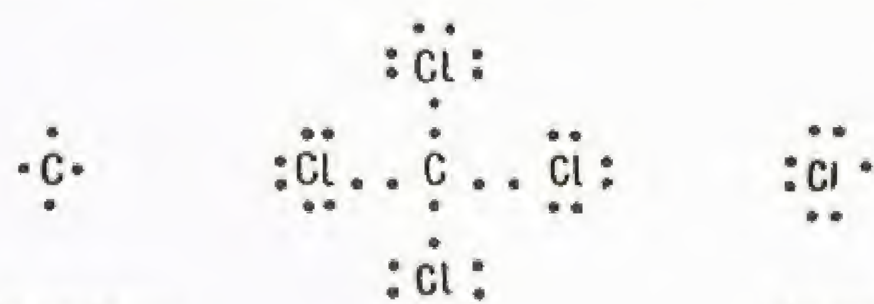
Considerando las combinaciones oxigenadas, se ve igualmente que *la valencia* **máxima** *de los elementos con respecto al oxígeno es igual al número de electrones periféricos*, que por tal razón se denominan **electrones de valencia.**

Estabilidad de los iones. — El átomo de *sodio* difiere del átomo de *neón* por un electrón suplementario. El átomo de *cloro* difiere del átomo de *argón* por un electrón de menos. El paso de un electrón de uno a otro transforma el átomo de sodio en ion Na^+, cargado positivamente, y el átomo de cloro en ion Cl^-, cargado negativamente. Los dos iones así formados tienen la *estructura electrónica de un gas raro*, razón por la que son particularmente estables.

Puesto que el átomo de hidrógeno posee un electrón disponible, se comprende fácilmente que los elementos de las columnas de la derecha se combinen con uno, dos o tres átomos de hidrógeno para dar compuestos. Estos elementos son los **metaloides.** Los de las columnas de la derecha son los **metales.**

Covalencias. — Los elementos del grupo IV, *carbono* (6), *silicio* (14), encerrados en la segunda y tercera línea, poseen cuatro electrones de valencia.

Estos elementos no manifiestan una tendencia marcada a formar iones.



átomo de carbono

átomo de cloro

Se asocian con otros átomos susceptibles de completar su capa periférica hasta los ocho electrones requeridos, pero los compuestos moleculares así obtenidos no son disociables.

Así, el carbono y el cloro se reparten sus electrones *periféricos* de manera que cada átomo esté rodeado por un grupo de ocho electrones llamado *octeto*. Según esto, al tetracloruro de carbono, CCl_4, le corresponde la configuración dada al final de la columna anterior, en la que uno de los siete electrones de cada átomo de cloro forma un par común con un electrón periférico del carbono, de manera que cada átomo está rodeado por un octeto.

Las valencias obtenidas por la puesta en común de electrones, en las que no hay desplazamiento de éstos, se llaman **covalencias.**

Las covalencias determinan los enlaces en los cuerpos orgánicos (v. QUÍMICA ORGÁNICA, pág. 314) y en los iones complejos: OH^-, NO_3^-, SO_4^{--}, etc.

Papel de los electrones planetarios. — Las *propiedades químicas* de un elemento dependen exclusivamente de los *electrones de valencia*, que son los únicos que pueden ser cedidos por el átomo para formar iones. Por el contrario, los electrones de las capas internas no juegan el menor papel desde el punto de vista químico. Se manifiestan solamente por la *emisión de radiaciones*.

Elementos de transición. — Al pasar a la cuarta línea de la tabla, el número de elementos de cada período aumenta. Del argón al kriptón y del kriptón al xenon hay dieciocho elementos, y treinta y dos del xenón al radón.

Los elementos *inmediatos a los gases raros*, rubidio, cesio (metales monovalentes), estroncio, bario (metales divalentes), bromo, yodo; selenio, telurio; arsénico, antimonio (metaloides de los grupos VII, VI y V), presentan las propiedades habituales de los elementos del grupo correspondiente, lo que no sucede cuando los elementos están alejados de los gases raros. Por otra parte, se observa que, en una misma columna, las analogías se desdibujan progresivamente y que, por el contrario, las variaciones bruscas de las propiedades desaparecen cuando, en una misma línea, se pasa de una columna a otra.

Así, el *hierro* (n. a. = 26), el *cobalto* (n. a. = 27) y el *níquel* (n. a. = 28), alejados a la vez del argón (n. a. = 18) y del kriptón (n. a. = 36), tienen propiedades muy semejantes. Este hecho justifica que se les atribuya una clasificación especial en la columna VIII a. Otro tanto se puede decir de las otras dos *tríadas* Ru — Rh — Pd y Os — Ir — Pt, correspondientes respectivamente al paladio y al platino.

Estos elementos, muy próximos a la vez por el número atómico y por sus propiedades, se llaman **elementos de transición.**

Un grupo muy especial de elementos de transición es el constituido por los metales llamados **tierras raras** (o escasas), trivalentes, que se extienden desde el lantano (57) hasta el lutecio (71).

Estos elementos manifiestan tal afinidad en sus propiedades, que sus combinaciones pueden ser separadas unas de otras sólo por cristalización fraccionada. El análisis espectral facilita el único medio de reconocerlos.

La existencia de elementos de transición se explica fácilmente suponiendo que *las capas correspondientes de electrones de valencia son idénticas*, pero que, en cambio, *las capas subyacentes están incompletas*.

El aumento del número atómico, de un elemento a otro, provoca la *saturación* progresiva de dichas capas internas, lo que se manifiesta por una modificación de los espectros y no por una variación de las propiedades químicas.

Espécimen de varios signos de abreviatura empleados por los químicos en el siglo XVIII
Extraído de la *Encyclopédie* de Diderot y d'Alembert (*Fot. Larousse*)

Caracteres generales de las reacciones químicas

Realización de las reacciones. — Cuando se ponen dos cuerpos en contacto, se dice que tiene lugar una **reacción** si se observa la existencia de transformaciones químicas de las substancias consideradas.

Ciertas reacciones que no se realizan espontáneamente, pueden, en cambio, ser provocadas si se modifican las **condiciones de la experiencia.** Con tal fin, se pueden utilizar **agentes físicos:** contacto de los reactivos, temperatura, presión, choque, acciones luminosas, eléctricas, etc.

Así, una mezcla de hidrógeno (2 volúmenes) y oxígeno (1 volumen) permanece indefinidamente estable a la temperatura ordinaria, pero si se eleva la temperatura a 120° C comienza a tener lugar la formación de agua.

El hidrógeno y el cloro no reaccionan en la obscuridad, pero se combinan enérgicamente por acción de los rayos luminosos, dando origen al ácido clorhídrico gaseoso.

Se puede igualmente hacer intervenir ciertos cuerpos accesorios, llamados **catalizadores,** cuya presencia, en proporciones a veces ínfimas, hace posible que se verifique una reacción considerada de otra manera como inoperante.

La presencia de platino finamente dividido (negro de platino) hace posible la reacción del hidrógeno y el oxígeno a la temperatura ordinaria.

La presencia de *fermentos* (diastasas) en cantidades pequeñas es indispensable para la transformación de los azúcares en alcohol.

Si, a pesar de la acción de todos estos medios, no se manifiesta reacción alguna, se dice que los cuerpos son **indiferentes.**

Observación. Las transformaciones químicas (descomposiciones o disociaciones) efectuadas a expensas de combinaciones únicas se asimilan a las reacciones.

Velocidad de las reacciones. — La descomposición explosiva de la pólvora, la precipitación del cloruro de plata que ocurre cuando se mezclan dos soluciones de cloruro sódico y nitrato de plata son otros tantos ejemplos de reacciones que se efectúan en un tiempo muy corto.

En cambio, el cloro y el hidrógeno se combinan lentamente a la luz difusa para dar ácido clorhídrico gaseoso.

Tales consideraciones han dado origen a la noción de **velocidad de reacción,** que precisamos más adelante.

En realidad, no existen reacciones rigurosamente instantáneas. Por lo tanto, se puede decir que los agentes que provocan las reacciones son *aceleradores* que aumentan la velocidad de éstas, y a este título serán estudiados en el capítulo siguiente. Se puede también decir que dos cuerpos son indiferentes uno con respecto a otro cuando su *velocidad de reacción es nula.*

Reacciones reversibles. — Se dice que una reacción es **reversible** cuando la reacción **inversa,** es decir, la formación de los cuerpos primitivos a expensas de los originados, puede tener lugar *con una velocidad apreciable* en las mismas *condiciones* experimentales.

En ciertas condiciones de temperatura, el anhídrido sulfuroso, SO_2, puede reaccionar con el oxígeno del aire y transformarse en anhídrido sulfúrico, SO_3, según la ecuación



$$2SO_2 + O_2 \rightarrow 2SO_3,$$

pero la reacción inversa



$$2SO_3 \rightarrow 2SO_2 + O_2$$

es igualmente posible.

La oxidación del anhídrido sulfuroso en estas condiciones constituye una reacción reversible.

Reacciones totales; reacciones limitadas. — Se dice que una reacción, lenta o rápida, es **total** cuando las substancias puestas en juego se transforman íntegralmente en los cuerpos previstos por la reacción.

Un ejemplo de reacción total nos lo da la neutralización de un ácido por una base. La existencia de reacciones totales justifica los métodos utilizados en análisis cuantitativo.

Cuando una reacción no es total, se dice que es **limitada** o **parcial.** Se llama **rendimiento** de una reacción la relación, expresada en tanto por ciento, entre la masa de los cuerpos formados y la masa de los que se hubieran originado si la reacción hubiese sido total. Así, se dirá que el rendimiento de tal o cual reacción es de 40%, de 75%, etcétera. Las reacciones **reversibles** son *limitadas* precisamente porque tiene lugar simultáneamente la reacción inversa. Ahora bien, existen

otras causas que pueden limitar las reacciones, entre las que citaremos:

a) La disminución considerable de la velocidad de reacción;

b) La superposición a la reacción principal de reacciones **secundarias** que se verifican ya entre los propios reactivos, ya entre los cuerpos originados, ya entre éstos y los reactivos.

En este caso, se observará la formación de productos accesorios al lado de los cuerpos previstos por la reacción.

Cambios de energía en las reacciones. — En la mayor parte de los casos, las reacciones químicas van acompañadas por una liberación o por una absorción de energía en formas diversas: calorífica, mecánica, eléctrica, etc.

Las reacciones son **exotérmicas** cuando se efectúan con *desprendimiento* de calor, y **endotérmicas** cuando evolucionan con *absorción* de calor.

El estudio de las cantidades de calor puestas en juego en las reacciones constituye el terreno propio de la **termoquímica.**

Velocidad de las reacciones

Factores físicos: Contacto de los reactivos. Concentración. Presión. Choques. Temperatura. Acciones eléctricas. Efecto de las radiaciones. — **Catálisis:** Catalizadores. Catalizadores negativos y estabilizadores. Mecanismo de la catálisis. Catálisis de las reacciones reversibles. — **Definición y medida de la progresión y de la velocidad de las reacciones:** Curvas de progresión de las reacciones en función del tiempo. Definición de la velocidad de reacción. Medidas en medio homogéneo. Hipótesis relativa a las velocidades de reacción en medio homogéneo. Expresión matemática de la velocidad a temperatura constante

Vamos a pasar revista, en este capítulo, a los factores y acciones físicas o catalíticas que influyen sobre la velocidad de las reacciones. Damos a continuación un resumen relativo a la medida de dicha velocidad y a su expresión matemática.

Factores físicos

Contacto de los reactivos. — Las reacciones se producen por contacto de las moléculas puestas en juego.

Cuando los reactivos constituyen un medio *homogéneo*, líquido o gaseoso, las moléculas (o los iones) se encuentran libres y en estado de agitación perpetua. En estas condiciones, las partículas tendrán el máximo de probabilidades de chocar unas con otras. De todas maneras, las reacciones pueden también ocurrir en medio *no homogéneo*. Se las favorece aumentando las superficies de contacto entre los reactivos.

(Por ejemplo, conviene que los sólidos estén finamente pulverizados; los líquidos, emulsionados en estado de gotas muy finas, etc.)

La agitación hace que se renueven las superficies de contacto.

En los medios heterogéneos, ocurre a menudo que los reactivos son parcialmente solubles unos en otros, circunstancia favorable a la reacción.

Concentración. Presión. Choques. — La *concentración* de los reactivos hace que aumente el número de moléculas en un volumen dado, de manera que se encontrarán unas con otras con mayor facilidad. En lo que afecta a las mezclas que contienen gases o vapores, la concentración se manifiesta por un aumento de la *presión*. Los *choques mecánicos* provocan las reacciones explosivas (cebadura de los explosivos); pueden ser considerados a modo de sobrepresiones temporales.

Temperatura. — La elevación de la temperatura provoca un aumento de la agitación de las partículas, favoreciendo así las reacciones, puesto que los choques son más frecuentes.

Cuando una reacción es *exotérmica*, basta a veces una *acción local de calor* para provocarla; en estas condiciones, la reacción prosigue por sí sola, gracias al calor que desprende.

Tal es el caso de la formación de agua a partir del hidrógeno, que se quema en el aire después de haber sido "encendido" por efecto de un cuerpo incandescente o de una chispa eléctrica.

Acciones eléctricas. — La *chispa* ejerce su acción en la mayor parte de los casos por el *calor* que cede. Así, en el arco eléctrico, se pone en juego el efecto térmico.

Ahora bien, el *efluvio* puede provocar ciertas reacciones (por ejemplo, la transformación de oxígeno en ozono), sin intervención de una cantidad de calor apreciable.

Efecto de las radiaciones. — Las *radiaciones luminosas* favorecen ciertas reacciones. Las más activas son las de longitud de onda corta, azules, violeta y ultravioleta (éstas fuera del espectro visible). Se les llama radiaciones **actínicas.** Los *rayos X* gozan de las mismas propiedades. En cambio, la influencia de las radiaciones *rojas* e *infrarrojas* es mucho menos sensible.

Grotthus enunció, en 1818, la ley fotoquímica siguiente: "Sólo la luz absorbida ejerce un efecto fotoquímico".

Catálisis

Catalizadores. — Los *catalizadores* son unos cuerpos auxiliares cuya presencia acelera la velocidad de las reacciones. Se encuentran inalterados al final de la reacción.

Son extremadamente numerosos. Citemos en particular:

El *agua*, cuya presencia en vestigios parece ser indispensable para la obtención de la mayor parte de las reacciones (le mezcla detonante no explota si está absolutamente seca, a pesar de la acción repetida de chispas eléctricas; la presencia de vestigios de agua hace posible la reacción);

Los *ácidos*, que catalizan las reacciones de esterificación y de hidrólisis, probablemente por efecto de los iones H^+;

Las *bases*, que favorecen las saponificaciones, por acción de los iones OH^-;

Ciertas *sales minerales* (cloruro de cobre, sales de manganeso, de vanadio, cromatos, vanadatos, etc.), que catalizan las hidrogenaciones o las oxidaciones;

Ciertos *óxidos metálicos* (el óxido de hierro se emplea para la síntesis del ácido sulfúrico, el óxido de cinc para la del alcohol metílico);

Ciertos *metales divididos* (el níquel procedente de la reducción del óxido a baja temperatura o del ataque de la aleación níquel-aluminio de Raney por la sosa es un catalizador de hidrogenación muy activo; el paladio y el platino, finamente divididos, favorecen las hidrogenaciones y las oxidaciones);

Las *diastasas*, o *fermentos solubles*, segregadas por ciertos organismos vivos, que provocan, en general de manera selectiva, determinadas reacciones (desdoblamiento de los hidratos de carbono, de los albuminoides, de las grasas, fermentación alcohólica, etc.).

Catalizadores negativos y estabilizadores. — Los catalizadores tienen como fin acelerar la velocidad de las reacciones; se llama *catalizadores negativos* a los cuerpos que, por el contrario, disminuyen dicha velocidad.

Entre éstos, citaremos los catalizadores negativos de oxidación, o *antioxígenos*, que inhiben la oxidación por el oxígeno de numerosas substancias (Ch. Moureu y Ch. Dufraisse).

Mecanismo de la catálisis. — Es imposible definir con toda certidumbre el modo de acción de los catalizadores. En los diferentes casos, tres teorías permiten interpretar los fenómenos de manera casi satisfactoria.

La *teoría química* supone que el catalizador forma, con uno de los reactivos, una combinación que se destruye ulteriormente por reacción con el segundo reactivo. En esta segunda operación, queda regenerado el catalizador y puede seguir jugando el papel de intermediario.

La *teoría física* admite que el catalizador obra atrayendo a su superficie los diversos reactivos de la misma manera que las fibras textiles retienen los colorantes (fenómeno de adsorción). Estos reactivos, suficientemente concentrados en una película muy fina, pueden participar así en la reacción.

La teoría física se justifica sobre todo en el caso de los metales divididos.

La *teoría electrolítica* explica por un efecto de *pila* los ataques de los metales por los ácidos (para que el ácido clorhídrico pueda atacar el cinc puro, se requiere la presencia de vestigios de otro metal).

Catálisis de las reacciones reversibles. — La experiencia y la teoría concuerdan en que la acción de los catalizadores se limita a *modificar la velocidad* de las reacciones, sin que dichos cuerpos puedan invertir el *sentido* de éstas. En estas condiciones, un mismo catalizador puede, en el caso de las reacciones reversibles, favorecer tanto la reacción inversa como la directa. Su acción permite simplemente alcanzar la posición de equilibrio en un tiempo más corto.

La acción de los catalizadores puede ser comparada a la de un lubricante en un mecanismo (pequeñas dosis, producto inalterado al final). Los catalizadores disminuyen los "rozamientos", o, dicho en otras palabras, la *inercia química*.

Definición y medida de la progresión y de la velocidad de las reacciones

Curvas de progresión de las reacciones en función del tiempo. — Se puede seguir la progresión de una reacción evaluando

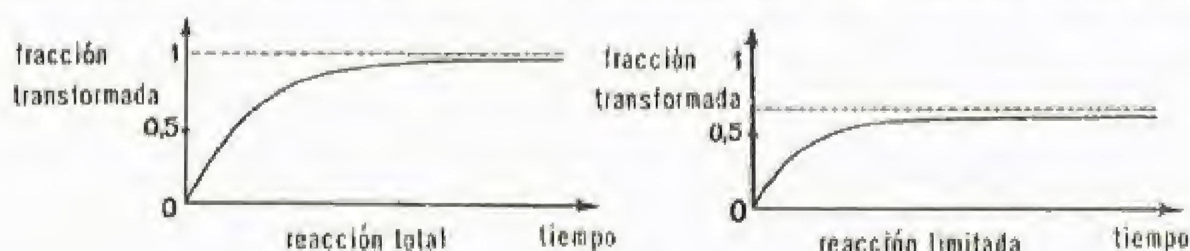


Fig. 2

en cada instante la relación entre la masa de reactivos transformada y la masa total por transformar.

Para efectuar las medidas, se retira, de cuando en cuando, una parte alícuota de la mezcla reaccionante, en la que se dosifica ya uno de los cuerpos que se forman, ya uno de los que desaparecen. En estas condiciones, se calcula fácilmente la fracción de reactivos transformada en el momento en que se ha hecho la toma.

Los diferentes valores así obtenidos permiten construir la curva de la progresión de la reacción en función del tiempo.

La experiencia enseña que el aspecto general de todas estas curvas es el mismo: suben rápidamente al principio, y se acercan asintóticamente de un máximo, que es igual a 1 cuando la reacción puede ser total, o inferior a 1 si la reacción es limitada.

Observación. Las medidas son posibles solamente si las velocidades de reacción no son demasiado grandes. Naturalmente, la cantidad de los cuerpos reaccionantes debe ser tal que se puedan considerar como despreciables las tomas efectuadas.

Definición de la velocidad de reacción. — Se puede calcular en cada instante la **velocidad de la reacción** dividiendo el incremento de la fracción transformada de la masa reaccionante por el intervalo de tiempo en que se ha producido.

La velocidad de reacción varía en función del tiempo (disminuye); en cada instante, es representada por la *pendiente* de la curva de progresión de la reacción (*fig.* 2).

La velocidad tiende a anularse al cabo de un tiempo suficientemente largo.

Medidas en medio homogéneo. — La experiencia demuestra que, cuando los reactivos forman una mezcla homogénea, se pueden comparar los resultados obtenidos en diferentes ensayos.

Esta consideración no es válida cuando se trata de un medio heterogéneo. Esta diferencia en el comportamiento se explica si se considera que las velocidades de reacción son influidas por las *condiciones de contacto* y que es difícil poder llegar a fijar éstas con seguridad absoluta.

En lo que respecta a la progresión, una hipótesis ha permitido clasificar en un número muy restringido de tipos las reacciones *en medio homogéneo*. Esta hipótesis se basa en la noción empírica de orden de una reacción.

Hipótesis relativa a las velocidades de reacción en medio homogéneo. — Se ha admitido que, en un medio homogéneo en el que las moléculas se encuentran libres y en estado de agitación perpetua, las velocidades de reacción son condicionadas exclusivamente por la *frecuencia de los choques* entre las moléculas.

El número de choques por unidad de tiempo varía en función directa de la temperatura y del número de moléculas presentes o, lo que es igual, aumenta con la concentración de cada uno de los reactivos.

Expresión matemática de la velocidad a temperatura constante. — Imaginemos una reacción que ponga en juego los cuerpos A, B, C, según la ecuación



$$A + B + C \rightarrow P + Q + \ldots$$

Para que la reacción llegue a efectuarse, será preciso que una molécula de A choque a la vez con una de B y otra de C.

Supongamos que se parte de



a moléculas de A,
b — B,
c — C.

Si, en un momento dado, han reaccionado *x* moléculas de cada uno de dichos cuerpos, quedarán



$a - x$ moléculas de A,
$b - x$ — B,
$c - x$ — C.

La *probabilidad de choque* de dichas moléculas es proporcional al número de moléculas presentes de cada especie.

En estas condiciones, la velocidad V de reacción, en el instante *t*, será representada por la ecuación

$$V = \frac{dx}{dt} = k\,(a - x)\,(b - x)\,(c - x),$$

en la que k es un factor de proporcionalidad de **valor constante para cada temperatura.**

Esta relación muestra que la velocidad *disminuye* cuando x (cantidad de moléculas formadas) aumente.

Observación. Si se llama C_A, C_B, C_C, a las concentraciones de cada uno de los cuerpos A, B, C, en cada instante, la velocidad en el instante t será expresada por la ecuación

$$V = k' C_A C_B C_C,$$

equivalente a la precedente.

Se emplea también corrientemente la notación que consiste en reemplazar la letra C (de concentración) por dos corchetes. Así, la ecuación anterior puede ser escrita:

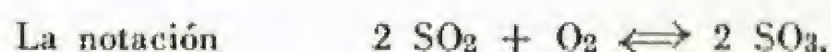
$$V = k'[A][B][C].$$

Equilibrios químicos

Esterificación. Disociaciones: Disociación del agua. Ley de acción de masas o ley de Guldberg y Waage. Aplicación de la ley de acción de masas a los equilibrios iónicos: pH. Comparación de los equilibrios químicos y mecánicos. Factores de equilibrio. Ley del desplazamiento del equilibrio (Le Châtellier). Desplazamiento del equilibrio por variación de la temperatura (Van't Hoff). Desplazamiento del equilibrio por variación de la presión. Desplazamiento del equilibrio por variación de la concentración. Equilibrios metaestables o falsos equilibrios. Inercia química. Caracteres de los falsos equilibrios. Aplicaciones de la ley del desplazamiento del equilibrio: Síntesis del ácido nítrico. Síntesis del gas amoniaco. Ácido sulfúrico de contacto. — **Regla de las fases:** Fases. Componentes independientes. Variantes o libertades de un sistema en equilibrio. Regla de las fases y aplicaciones: Equilibrio de un cuerpo puro líquido en presencia de su vapor. Equilibrio de un cuerpo puro en tres fases. Equilibrios agua-sal marina-vapor de agua. Disociación del carbonato cálcico

Definición. Ya hemos visto que se llama **reacción de equilibrio** toda reacción limitada por la reacción inversa, que se superpone a la directa.

Las reacciones de equilibrio se indican reemplazando el signo $\rightarrow$ por el signo $\Longleftrightarrow$.



La notación $2\,SO_2 + O_2 \Longleftrightarrow 2\,SO_3$,

expresa que, en las condiciones de la experiencia, la reacción puede tener lugar en los dos sentidos.

Las reacciones de equilibrio son frecuentes en *química orgánica*. Por su parte, la *química mineral* ofrece también casos muy interesantes.

Vamos a estudiar a continuación unos cuantos ejemplos de tales reacciones.

Esterificación. — La reacción entre una molécula de *ácido* y una molécula de *alcohol* da lugar a una molécula de un compuesto llamado *éster* y a una molécula de *agua*.

La reacción es reversible y se traduce por la expresión



$$\text{alcohol} + \text{ácido} \Longleftrightarrow \text{éster} + \text{agua}.$$

Si se hace reaccionar una mezcla equimolecular de ácido acético y alcohol etílico, se comprueba que la reacción se efectúa con una velocidad finita que disminuye progresivamente con el tiempo para, finalmente, anularse cuando la proporción de éster formado es de 66,5%.

Por otra parte, se comprueba que una mezcla equimolecular de agua y éster acético provoca una reacción inversa a la precedente, dando una mezcla de alcohol y agua. La reacción se detiene cuando queda aún por transformarse el 66,5% de éster.

Se dice que la reacción directa y la reacción inversa tienen un límite común definido por las **concentraciones invariables** de los diversos cuerpos presentes. Dichas concentraciones fijas caracterizan la **"posición de equilibrio".**

Se puede demostrar que la limitación de la **reacción directa se debe exclusivamente a la existencia de la reacción inversa.** Así, si se logra eliminar el agua formada, la esterificación resulta total.

Disociaciones. — Sainte-Claire Deville ha demostrado que ciertos cuerpos aparentemente muy estables, como el agua y el ácido clorhídrico, pueden descomponerse reversiblemente a temperaturas elevadas.

Las descomposiciones de este tipo que dan lugar a equilibrios químicos se designan con el nombre particular de **disociaciones.**

Estos fenómenos han pasado inadvertidos durante largo tiempo porque, al producirse el enfriamiento, la reacción inversa regenera íntegralmente el cuerpo primitivo. Ciertos artificios experimentales han permitido ponerlos de evidencia.

Disociación del agua. — La disociación del agua comienza a verificarse por encima de 1 200° C, de acuerdo con la reacción reversible



$$2H_2O \Longleftrightarrow 2H_2 + O_2.$$

Se puede poner de manifiesto la disociación parcial del agua separando el hidrógeno y el oxígeno formados, de modo que no puedan combinarse de nuevo.

Se utiliza para ello un aparato (*fig.* 3) formado por dos tubos concéntricos *a* y *b*, de porcelana, calentados en un horno. Por el tubo central, de porcelana *porosa*, pasa una corriente de vapor de agua. El hidrógeno resultante de la disociación, por ser más ligero, se difunde con mayor rapidez que el oxígeno a través de los poros del tubo y pasa al espacio anular, en el que es arrastrado rápidamente por una corriente de anhídrido carbónico.

De esta manera, se recoge a la salida del tubo central una mezcla de

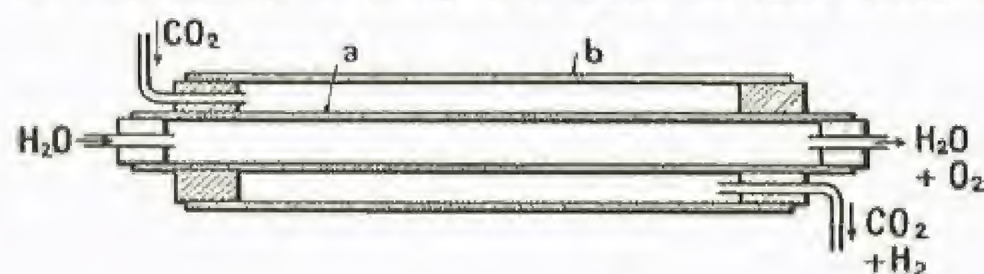


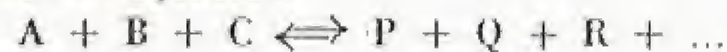
Fig. 3

agua y oxígeno, mientras que el hidrógeno sale por el tubo *b* mezclado con el anhídrido carbónico, del que se le separa fácilmente haciendo borbotar dicha mezcla en una solución de sosa.

Ley de acción de masas o ley de Guldberg y Waage. — Se puede admitir que se alcanza el estado de equilibrio de una reacción reversible cuando la *velocidad de la reacción inversa llega a ser igual a la de la reacción directa*, o dicho en otros términos, el estado de equilibrio se mantiene porque la cantidad de los cuerpos que se forman por unidad de tiempo es igual a la de los que se destruyen.

En estas condiciones, el equilibrio presenta un carácter ***estadístico*** y no *estático*: la composición de la mezcla permanece constante al igual que la población de un país en el que el número de personas que nacen por año es igual al de las que mueren.

Sea la reacción de equilibrio



$$A + B + C \Longleftrightarrow P + Q + R + \ldots$$

Si se representa por C_A, C_B, etc. la concentración de los diferentes cuerpos, la velocidad V de la reacción directa será expresada por

$$V = kC_AC_BC_C\ldots$$

La velocidad V' de la reacción inversa la dará la ecuación

$$V' = k'C_PC_QC_R\ldots$$

Cuando se llegue a la posición de equilibrio, las dos velocidades serán iguales, con lo que se establecerá la igualdad

$$kC_AC_BC_C\ldots = k'C_PC_QC_R\ldots,$$

que se puede escribir de la forma siguiente

$$\frac{C_AC_BC_C\ldots}{C_PC_QC_R\ldots} = \frac{k'}{k} = K_c.$$

Cuando el medio es homogéneo, la relación K_c es constante a una temperatura dada.

OBSERVACIÓN. En lo que respecta a los gases, se puede considerar la presión parcial en vez de la concentración.

En tal caso, se obtiene la relación $\frac{p_A p_B p_C}{p_P p_Q p_R} = K_p$.

Las relaciones que acabamos de exponer son la expresión matemática de la ley de **acción de masas** que se aplica a los equilibrios químicos.

Aplicación de la ley de acción de masas a los equilibrios iónicos: pH. — El agua conduce ligeramente la corriente eléctrica; se admite que está parcialmente disociada:



$$H_2O \Longleftrightarrow H^+ + OH^-.$$

Apliquemos la ley de acción de masas:

$$\frac{C_{H^+} \cdot C_{OH^-}}{C_{H_2O}} = K.$$

(C_{H^+} y C_{OH^-} son las concentraciones en iones-gramo por litro y C_{H_2O} la concentración en moléculas-gramo por litro.)

Puesto que la parte disociada es muy reducida, se puede considerar que C_{H_2O} es sensiblemente constante, y por lo tanto

$C_{H^+}\ C_{OH^-} = K_{H_2O}$, en donde $K_{H_2O} = 10^{-14}$ a la temperatura ordinaria.

En el agua pura, hay tantos iones H^+ como OH^-; por lo tanto,

$$C_{H^+} = C_{OH^-} = 10^{-7}.$$

Se dice que el medio es *ácido* cuando $C_{H^+} > 10^{-7}$, y que es *alcalino* o *básico* cuando $C_{OH^-} > C_{H^+}$, o sea $C_{H^+} < 10^{-7}$.

Es más cómodo utilizar el **pH**, definido por la relación

$$pH = -\log C_{H^+}.$$

Así, el **pH** del *agua pura* es igual a **7**; en medio *ácido*: **pH** < 7, y en medio *alcalino*: **pH** > 7.

Comparación de los equilibrios químicos y mecánicos. — Los equilibrios químicos pueden ser comparados a los equilibrios mecánicos **estables** *sin rozamientos*.

1° El sistema presenta una *posición de equilibrio* caracterizada por una serie de valores perfectamente definidos de temperatura, presión y composición de la mezcla.

2° Si se modifican temporalmente las condiciones del equilibrio (por ejemplo elevando momentáneamente la temperatura), el sistema vuelve a la misma posición de equilibrio una vez que cesa la perturbación.

3° Si se modifica de manera permanente uno de los factores del equilibrio, el sistema tiende a adquirir una nueva posición de equilibrio.

Hay que distinguir los equilibrios *reales* o estables, que se caracterizan por las condiciones que acabamos de exponer, y los *falsos equilibrios* o equilibrios metaestables (v. más adelante).

Factores de equilibrio. — Los factores que pueden intervenir para modificar el equilibrio son:

La concentración de los cuerpos en cada una de las fases;
La temperatura;
La presión.

Ley del desplazamiento del equilibrio (Le Châtelier). — Cuando se modifica uno de los factores del equilibrio, el sistema tiende hacia una nueva posición.

La *ley del desplazamiento del equilibrio* permite prever **el sentido** en que el equilibrio va a ser desplazado. Se la puede enunciar así:

Cuando un sistema se halla en equilibrio estable, la modificación de uno cualquiera de los factores del equilibrio provoca un desplazamiento de la posición del sistema en el sentido que tiende a atenuar el efecto de la causa perturbadora.

Esta ley caracteriza los equilibrios estables, y es de aplicación muy general. Así, no sólo se aplica a los equilibrios mecánicos, físicos, químicos, etc., sino igualmente a los fenómenos biológicos, sociológicos, etcétera.

Vamos a estudiar sucesivamente la influencia de las variaciones de temperatura, de presión y de concentración de los reactivos sobre los equilibrios químicos.

Desplazamiento de equilibrio por variación de la temperatura (Van't Hoff). — La elevación de la temperatura desplaza el equilibrio en el sentido que corresponde a una *absorción de calor*, favoreciendo así las reacciones *endotérmicas*.

Por el contrario, la **disminución** de la temperatura desplaza el equilibrio a favor de la reacción *exotérmica*.

Cuando una sal está en presencia de su solución saturada, tenderá a *disolverse* si se *eleva la temperatura*, a condición que la disolución se efectúe *absorbiendo calor* (que es con mucho el caso más general).

Se concibe que las reacciones muy endotérmicas, como la disociación del agua, se efectúen con rendimiento apreciable solamente a temperaturas elevadas.

Desplazamiento del equilibrio por variación de la presión. — El **aumento** de la presión favorece la reacción en el sentido en que *disminuye* el *volumen* de la masa. En cambio, la **disminución** de la presión favorece la reacción que va acompañada por un *aumento del volumen*.

La obtención reversible del gas amoniaco a partir de sus elementos



$$N_2 + 3H_2 \Longleftrightarrow 2NH_3$$

se verificará con tanto mayor rendimiento cuanto mayor sea la presión, porque el volumen del amoniaco es menor que el de la mezcla de nitrógeno e hidrógeno.

OBSERVACIÓN. Cuando una reacción tiene lugar sin *variación de volumen*, como la disociación del cloruro de hidrógeno



$$H_2 + Cl_2 \Longleftrightarrow 2HCl,$$

el equilibrio es *independiente de la presión*.

El equilibrio puede ser independiente de la temperatura si las *cantidades de calor que se ponen en juego son despreciables*.

Tal es el caso de la esterificación: la elevación de la temperatura no modifica sensiblemente el equilibrio.

Desplazamiento del equilibrio por variación de la concentración. — Si se aumenta la concentración de uno de los cuerpos en equilibrio, la reacción se efectuará en sentido que tenderá a la desaparición de dicho cuerpo, y en sentido inverso si se disminuye.

Este resultado se deduce fácilmente de la ley de acción de masas.

Se puede incrementar el rendimiento de una esterificación, por una parte aumentando la masa de alcohol, y por otra eliminando el agua formada.

Equilibrios metaestables o falsos equilibrios. Inercia química. — Al lado de los equilibrios que acabamos de estudiar, que se rigen por la ley de Le Châtelier, se manifiestan otros casos de reposo químico (ausencia de reacción) cuyo origen es completamente diferente.

Ya hemos visto cómo la mezcla detonante puede mantenerse indefinidamente a la temperatura ordinaria sin que se observe la formación de agua. Sin embargo, basta introducir en el seno de la mezcla una cantidad ínfima de platino finamente dividido para provocar la reacción.

El *equilibrio* de la mezcla detonante es comparable al de un cuerpo situado en un plano inclinado rugoso. El cuerpo, que normalmente debería deslizarse hacia abajo por efecto de la gravedad, permanece *inmóvil* a causa de los *rozamientos* mecánicos.

Se admite que la ausencia de reacción entre el hidrógeno y el oxígeno es causada por una **inercia química,** semejante a la inercia resultante de los rozamientos. La esponja de platino, que cataliza la reacción, juega un papel análogo al de un lubricante.

Se llama **equilibrios metaestables** o **falsos equilibrios** a los que deben su origen a esta inercia química.

Caracteres de los falsos equilibrios. — Mientras que los equilibrios verdaderos son caracterizados por valores *definidos* de los factores, los falsos equilibrios se verifican por aplicación de valores de temperatura, presión y concentración *comprendidos entre límites más o menos amplios*. Así, la mezcla detonante se encuentra en falso equilibrio en la *zona de temperaturas inferior* a 120°C, de la misma manera que un cuerpo permanece inmóvil en un plano inclinado mientras la pendiente de éste no rebase cierto valor.

La ley de Le Châtelier no rige en los casos de falsos equilibrios. Si calentamos localmente la mezcla detonante, se ceba la reacción. Ahora bien, como la reacción es exotérmica, el calor desprendido elevará la temperatura de las porciones vecinas en progresión creciente hasta que la reacción sea total; en estas condiciones, ésta puede adquirir un carácter explosivo.

El enfriamiento brusco y el temple provocan la vuelta de los sistemas a las zonas de falso equilibrio antes de que hayan tenido tiempo de producirse las reacciones reversibles.

Aplicaciones de la ley del desplazamiento del equilibrio. — Vamos a dar como ejemplos ciertas reacciones reversibles utilizadas en las síntesis industriales de importancia considerable.

Síntesis del ácido nítrico. — Se realiza ésta a partir del óxido nítrico formado en la reacción reversible



$$N_2 + O_2 \Longleftrightarrow 2NO.$$

La reacción directa es fuertemente *endotérmica*. Por lo tanto, el rendimiento será tanto mayor cuanto *más elevada sea la temperatura*.

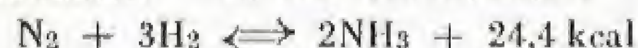
Por otra parte, la reacción indica que el óxido nítrico ocupa el mismo volumen que la mezcla de nitrógeno y oxígeno. Como la reacción ocurre con variación de volumen, el equilibrio es **independiente de la presión.**

Por consiguiente, se operará a la presión ordinaria. Para que el rendimiento sea apreciable, es necesario aplicar la temperatura elevada del arco eléctrico. Por otra parte, el horno deberá estar concebido de manera que sea posible enfriar bruscamente el óxido nítrico formado, a fin de que éste pase a la zona de falso equilibrio antes de que pueda tener lugar su descomposición reversible. En presencia de agua y de un exceso de aire, el óxido nítrico se transforma en ácido nítrico



$$2NO + \frac{}{2} O_2 + H_2O \Longleftrightarrow 2NO_3H.$$

Síntesis del amoniaco. — La reacción reversible



$$N_2 + 3H_2 \Longleftrightarrow 2NH_3 + 24{,}4 \text{ kcal}$$

es exotérmica. Por otra parte, la acción de un volumen de nitrógeno sobre tres de hidrógeno origina dos volúmenes de gas amoniaco. Por lo tanto, la reacción directa se efectúa con *contracción de volumen.* Aplicando la ley de Le Châtelier, se concluye que se mejorará el rendimiento:

1º Operando a la temperatura más baja que sea posible;
2º Operando a presión.

Ahora bien, cuando se disminuye la temperatura de la mezcla de nitrógeno e hidrógeno, aumenta la inercia química. Para disminuir ésta, se hace uso de un catalizador (platino). Se opera prácticamente hacia 500º C.

El empleo de presiones del orden de 1 000 atmósferas ha permitido aumentar considerablemente el rendimiento (procedimiento Claude).

Ácido sulfúrico de contacto. — El anhídrido sulfúrico gaseoso SO_3 se forma en la oxidación reversible del anhídrido sulfuroso por el aire:



$$2SO_2 + O_2 \Longleftrightarrow 2SO_3.$$

La reacción directa es exotérmica y se verifica con contracción de volumen. Por consiguiente, el rendimiento será óptimo a temperatura relativamente baja y a presión elevada. El rendimiento aumenta en presencia de un exceso de aire.

Se opera prácticamente hacia 450º C, utilizando un catalizador. En general, la reacción se efectúa a la presión ordinaria, pues el beneficio debido al aumento de presión no compensa de la complicación en tal caso requerida por la instalación.

Regla de las fases

La regla de las fases, descubierta por **J. W. Gibbs** en 1878, ha permitido establecer una clasificación de los equilibrios heterogéneos que presenta, entre otras ventajas, la de definir la interdependencia entre los equilibrios físicos y químicos.

Fases. — *Se llama* **fase,** *en un sistema heterogéneo, toda fracción, cualquiera que sea su estado de división, que constituye una materia homogénea, separable por métodos mecánicos.*

Así, una mezcla de azufre pulverizado y limaduras de hierro comprende dos fases: la fase azufre y la fase hierro.

Una solución de azufre en sulfuro de carbono constituye una sola fase.

Debe tenerse en cuenta que una mezcla de sólidos consta de tantas fases como de cuerpos diferentes.

Una mezcla de líquidos, o de líquidos y sólidos, comprende una o varias fases según que los cuerpos estén o no completamente disueltos.

Una mezcla gaseosa constituye siempre una sola fase, puesto que todos los gases y vapores son miscibles en cualquier proporción.

Componentes independientes. — *Se llama* **número de componentes de un sistema** *el número* **mínimo** *de cuerpos puros requeridos para reconstituir el sistema.* Por ejemplo, el sistema agua, hielo y sal consta de dos componentes independientes: el agua y la sal, puesto que el hielo no es sino el cuerpo puro *agua* presentado en otro estado físico.

En general, el *número de componentes independientes es igual al número total de componentes menos el número de ecuaciones de equilibrio que rigen su interdependencia.*

Variantes o libertades de un sistema en equilibrio. — Un sistema en equilibrio está definido por los factores: tempertura, presión, concentraciones.

De la misma manera que es posible modificar a voluntad uno cualquiera de esos factores para alcanzar un nuevo estado de equilibrio, es imposible imponer a *todos* un valor *elegido arbitrariamente.* Su interdependencia es tal, que al modificar ciertos factores hasta un valor determinado, el valor de los demás queda perfectamente fijado.

Se llama **variante** *o* **libertad** *de un sistema en equilibrio el número de factores que se pueden modificar arbitrariamente sin por ello destruir el equilibrio del sistema.*

Los sistemas se denominan **univariantes, divariantes,** etc., cuando el número de libertades es 1, 2, etc. Igualmente, existen ciertos sistemas **invariantes.**

Regla de las fases y aplicaciones. — *El número de libertades y de un sistema en equilibrio constituido por C componentes independientes y φ fases es dado por la relación*

$$v = C + 2 - \varphi.$$

El término 2 representa los dos factores temperatura y presión.

Exponemos a continuación unas cuantas aplicaciones.

Equilibrio de un cuerpo puro líquido en presencia de su vapor. — Ya hemos visto en física que si un líquido está en equilibrio con su vapor a una temperatura dada, la presión del vapor queda perfectamente determinada: es igual a la presión máxima del vapor a la temperatura considerada. Inversamente, si se fija la presión máxima del vapor, la temperatura queda determinada. De los dos factores: temperatura y presión, *sólo uno* puede variar libremente. Por lo tanto, el sistema en equilibrio líquido-vapor (1 componente, 2 fases) es univariante.

En efecto, la regla de las fases da:

$$v = 1 + 2 - 2 = 1.$$

Equilibrio de un cuerpo puro en tres fases. — Si se quiere realizar un equilibrio no sólo entre las fases líquida y vapor, sino también en presencia de la fase sólida, el sistema es posible solamente a una temperatura perfectamente determinada, a la que corresponde una presión igualmente determinada del vapor.

El sistema es *invariante.* En efecto, la regla de las fases da:

$$v = 1 + 2 - 3 = 0.$$

Este ejemplo muestra que *la aparición de una fase nueva disminuye las libertades en una unidad.*

Equilibrios agua-sal marina-vapor de agua. — Los factores variables de este sistema son la temperatura, la presión y la concentración de la solución salina. El número de componentes independientes es 2.

Si suponemos que la solución *no está saturada,* existen solamente dos fases: solución y vapor. Se podrán modificar la concentración y la temperatura, y la presión de vapor quedará así determinada.

El sistema es *divariante:* se puede hacer variar la temperatura y la concentración:

$$v = 2 + 2 - 2 = 2.$$

Puesto que el sistema líquido-vapor era univariante, se observa que *la presencia de un componente suplementario ha aumentado las libertades del sistema en una unidad.*

Sería fácil demostrar que si hubiera un exceso de sal, fase sólida suplementaria, el sistema resultaría univariante: siendo determinada la concentración de la solución, la única variante independiente sería la temperatura.

El sistema solución-sal sólida-hielo-vapor es *invariante.*

Disociación del carbonato cálcico. — Si se calienta carbonato cálcico en un recipiente cerrado, se puede observar la formación (a temperatura elevada) de una reacción reversible



$$CO_3CA \Longleftrightarrow CaO + CO_2$$

en la que se originan cal y anhidrido carbónico.

El número de fases en presencia es igual a tres: dos fases sólidas (CO_3Ca y CaO) y una fase gaseosa.

En este sistema de tres cuerpos, el número de componentes independientes se reduce a dos, puesto que existe una reacción de equilibrio.

El número de libertades es $v = 2 + 2 - 3 = 1$.

El sistema es *univariante.* A cada temperatura corresponde una presión determinada del anhídrido carbónico.

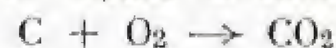
Termoquímica

Cambios de energía en las reacciones químicas. Energía interna. Variaciones de energía interna. Calor y trabajo mecánico. Principio del estado inicial y el estado final. Calor de reacción: Medida de los calores de reacción. Aplicaciones del principio del estado inicial y el estado final. Corolario del principio del estado inicial y el estado final. Poder calorífico de los combustibles. Energía utilizable. Comparación mecánica. Afinidad. Principio del trabajo máximo

Cambios de energía en las reacciones químicas. — Las reacciones químicas van generalmente acompañadas por cambios de energía. Las manifestaciones más corrientes son el desprendimiento o la absorción de calor. Por tal razón, se ha adquirido la costumbre de llamar *endotérmicas* las reacciones que absorben energía y *exotérmicas* las que liberan energía.

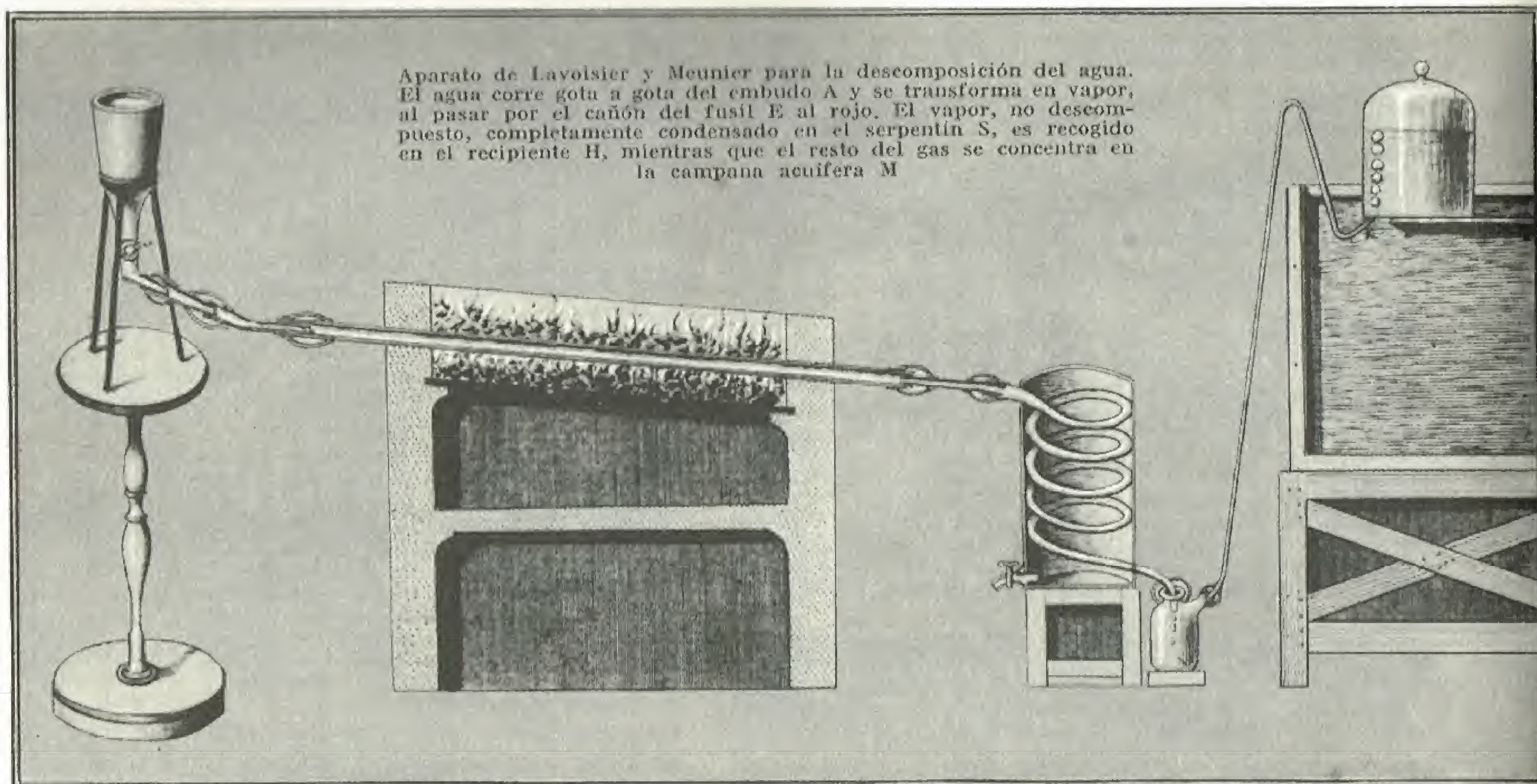
El *calor* desprendido en ciertas reacciones es objeto de importantes utilizaciones. Así, la calefacción industrial o doméstica se aprovecha del efecto térmico de la oxidación del carbono y el hidrógeno, libres o combinados en los combustibles; igualmente, se puede transformar una fracción de la energía de reacción en forma de energía *mecánica* (máquinas de vapor, motores de combustión interna, efecto rompedor de los explosivos, etc.). No nos ocuparemos aquí de las demás formas de energía (luminosa, eléctrica).

Energía interna. — Se explica el efecto térmico de la reacción:



$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

suponiendo que el sistema formado por los dos reactivos carbono y



Aparato de Lavoisier y Meunier para la descomposición del agua. El agua corre gota a gota del embudo A y se transforma en vapor, al pasar por el cañón del fusil E al rojo. El vapor, no descompuesto, completamente condensado en el serpentín S, es recogido en el recipiente H, mientras que el resto del gas se concentra en la campana acuífera M

oxígeno posee una reserva de cierta cantidad de *energía interna* (comparable con la energía potencial). La transformación química da lugar a otro sistema (anhídrido carbónico) cuya cantidad de energía interna es menor. El desprendimiento de calor queda compensado estrictamente por la disminución de la energía interna cuando se pasa del sistema inicial al sistema final.

La energía interna de un sistema depende exclusivamente del **estado** de dicho sistema y no de las transformaciones anteriores.

En efecto, si, por un ciclo determinado de transformaciones, pudiese el sistema volver a su estado inicial de manera que hubiera habido en total liberación de calor, se podría crear indefinidamente energía sin más que repetir la operación, lo que es imposible.

Variaciones de energía interna. — La energía interna, noción abstracta, no se presta a medidas. Así, es imposible conocer el valor U_1 de la energía interna de un sistema $C + O_2$, e igual ocurre con el valor U_2 de la energía interna del sistema CO_2 que le corresponde.

Sin embargo, la variación $U_1 - U_2$ de la energía interna, cuando se pasa del primer sistema al segundo, se halla *perfectamente definida*, puesto que representa la energía liberada en la transformación.

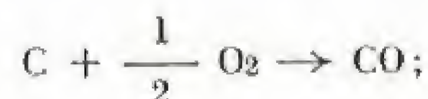
Como el valor U_1, desconocido, depende exclusivamente del estado inicial, y el valor U_2, igualmente desconocido, depende solamente del estado final, se llega a la conclusión de que la *energía liberada en una reacción* y que vale $U_1 - U_2$ *depende solamente de los estados inicial y final y es independiente de los estados intermedios.*

Así, la combustión directa de un átomo-gramo de carbono

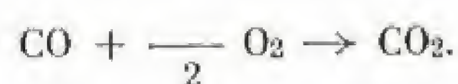


$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

desprenderá la misma cantidad de energía que las dos reacciones sucesivas:



$$C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO;$$



$$CO + \frac{\quad}{2} O_2 \rightarrow CO_2.$$

Observación. Cuando se define el estado de un sistema, hay que tener en cuenta todos los factores químicos y físicos. Así, la combustión del carbón de azúcar libera más calor que la del grafito: la energía interna del sistema *carbón de azúcar-oxígeno* es superior a la del sistema *grafito-oxígeno*. Igualmente, intervienen la temperatura, la presión y el estado físico de los reactivos: la energía interna de una masa de agua es mayor en estado de vapor que en estado líquido.

Calor y trabajo mecánico. — Las variaciones de la energía interna se manifiestan por un desprendimiento o una absorción de *calor* y de *trabajo mecánico*. Se puede establecer la equivalencia:

$$U_1 - U_2 = \text{energía calorífica} + \text{energía mecánica}.$$

La *suma algebraica* de los dos términos que forman el segundo miembro de la ecuación tiene un valor constante, pero cada uno de ellos puede variar según las condiciones experimentales.

El **trabajo mecánico** entra en juego cuando el *volumen de la masa reaccionante varía*, en cuyo caso *las fuerzas exteriores sufren un desplazamiento*. Generalmente, es necesario conocer todos los estados intermedios para calcularlo.

Por tal razón, *la fracción de energía puesta en juego* **en forma de calor** *depende generalmente de los* **estados intermedios.**

Principio del estado inicial y el estado final. — Sin embargo, hay casos en los que la *energía puesta en juego en forma calorífica es independiente de los estados intermedios*. Sucede esto:

1° Cuando la reacción tiene lugar *a volumen constante* (el trabajo es nulo);

2° Cuando la reacción tiene lugar *a presión constante* (por ejemplo, a la presión atmosférica). En estas condiciones, el trabajo está perfectamente definido: si p es la presión exterior, y v_1 y v_2 los volúmenes inicial y final, la energía mecánica es expresada por la ecuación

$$T = p(v_2 - v_1).$$

Estos casos son precisamente los más corrientes en la práctica.

Este principio, llamado **del estado inicial y el estado final,** se enuncia así:

La cantidad de calor desprendida o absorbida por una reacción efectuada ya a volumen constante, ya a presión constante, depende solamente de los estados inicial y final del sistema de cuerpos.

Corolario. *Cuando una reacción a volumen constante o a presión constante* **desprende calor,** *la reacción inversa* **absorbe la misma cantidad de calor.**

Calor de reacción. — Se llama *calor de reacción* el número de calorías desprendidas o absorbidas en una reacción efectuada sobre la base del número de *moléculas-gramo* indicadas en la ecuación de reacción.

Este valor se expresa generalmente (en calorías o en kilocalorías) en el segundo miembro de la ecuación, afectándole el signo + si la reacción es exotérmica, y el signo — si es endotérmica.

Por ejemplo:



$$\underset{\text{(diamante)}}{C} + O_2 \rightarrow CO_2 + 94 \text{ kcal.}$$

El calor de reacción toma los nombres particulares de *calor de combustión* cuando se trata de oxidaciones completas en presencia de aire o de oxígeno, y de *calor de formación* si la reacción consiste en una síntesis a partir de los elementos.

Medida de los calores de reacción. — Los calores de reacción se miden por medio de los *calorímetros* (v. Física, págs. 38 y 39), provocando la reacción en el interior de estos aparatos.

Para la determinación de los *calores de combustión* se utiliza la *bomba calorimétrica* (v. pág. 41), imaginada por Berthelot.

Se provoca la combustión de la substancia en el interior de un recipiente de acero resistente, cuya pared interna está esmaltada o revestida de platino. El cuerpo que se trata de estudiar se coloca en una naveta de platino colgada en el centro de la bomba. Se introduce oxígeno puro a través de una válvula de puntero, a una presión de 25 kg/cm². En estas condiciones, se sumerge el aparato en el agua del calorímetro.

Se provoca la combustión haciendo pasar la corriente eléctrica por una espiral muy fina de hierro que se pone en contacto con la substancia.

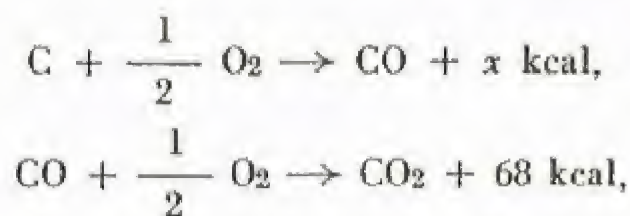
La elevación de la temperatura del calorímetro permite calcular el calor desprendido.

Aplicaciones del principio del estado inicial y el estado final. — El principio del estado inicial y el estado final permite calcu-

lar el valor de ciertos calores de reacción cuya medida directa es prácticamente imposible.

Ejemplo. *Calor de formación del óxido de carbono.* Es imposible realizar la reacción $C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$ en un calorímetro. Lo que, en cambio, sí se puede hacer es medir por separado los calores de combustión del carbono y el óxido de carbono.

En efecto, el calor total desprendido al cabo de las dos reacciones sucesivas



$$C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO + x \text{ kcal},$$

$$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2 + 68 \text{ kcal},$$

debe ser igual al calor de combustión del carbono



$$C + O_2 \rightarrow CO_2 + 94 \text{ kcal}.$$

De estas ecuaciones se deduce que la formación del óxido de carbono es exotérmica y que en la reacción se desprenden

$$x = 94 - 68 = 26 \text{ kcal}.$$

Corolario del principio del estado inicial y el estado final. — Se puede enunciar el corolario siguiente cuya demostración es inmediata:

El calor desprendido en una reacción es algebraicamente igual al exceso de los calores de formación de los cuerpos que se forman sobre los calores de formación de los cuerpos que desaparecen.

En particular, el calor de combustión de un cuerpo orgánico es igual a la suma de los calores desprendidos por la combustión separada del carbono y el hidrógeno, menos el valor *algebraico* correspondiente al calor de formación de dicho cuerpo. Si el compuesto es endotérmico (caso del acetileno), su calor de combustión es superior al de la combustión de sus elementos por separado.

Poder calorífico de los combustibles. — La determinación de los calores de combustión ofrece un interés práctico considerable para la apreciación de la calidad de los combustibles.

Se llama **poder calorífico** el número de calorías desprendidas en la combustión de 1 kg del combustible considerado (o de 1 m^3 si se trata de un gas).

El poder calorífico del carbono puro amorfo es muy próximo de 8 100 kcal. El de los carbones industriales oscila alrededor de 7 000 kcal.

Los carburantes empleados en los motores y para la calefacción desprenden anhídrido carbónico y agua al quemarse. El calor desprendido no tiene el mismo valor si el agua permanece en estado de vapor que si es condensada. En el primer caso, que corresponde, en general, a la utilización práctica, se dice que el poder calorífico es *inferior*, y *superior* en el segundo caso.

El poder calorífico de un hidrocarburo es tanto mayor cuanto mayor es la proporción que contiene de hidrógeno. (Si se desprecia el calor de formación del hidrocarburo, la combustión de 1 g de carbono desprende $\frac{94}{12} = 8$ kcal. aproximadamente, mientras que la de 1 g de hidrógeno desprende $\frac{69}{2} = 34$ kcal aproximadamente.)

Energía utilizable. Comparación mecánica. — Una piedra situada en un llano a 1 000 metros de altitud posee más *energía potencial* que una piedra idéntica colocada en equilibrio metaestable a un nivel más bajo, en un terreno que forme una pendiente pronunciada. Sin embargo, si se rompe el falso equilibrio, la segunda piedra podrá rodar sobre la pendiente y suministrar energía mecánica. Se dice que su energía potencial es *utilizable*.

Afinidad. — La afinidad química es la tendencia que tienen los cuerpos a reaccionar unos con otros. La comparación que acabamos de exponer muestra que depende no de la *energía interna* del sistema de los cuerpos presentes en la reacción, sino de la *energía utilizable*, magnitud que no se puede medir por método alguno.

Principio del trabajo máximo. — Berthelot no establecía diferencia entre la energía interna y la energía utilizable, y creía poder medir la afinidad por la cantidad de calor desprendida en las reacciones.

Su principio, llamado del *trabajo máximo*, no presenta la generalidad que su autor le atribuía. Cuenta habida de esta consideración, se le puede enunciar así:

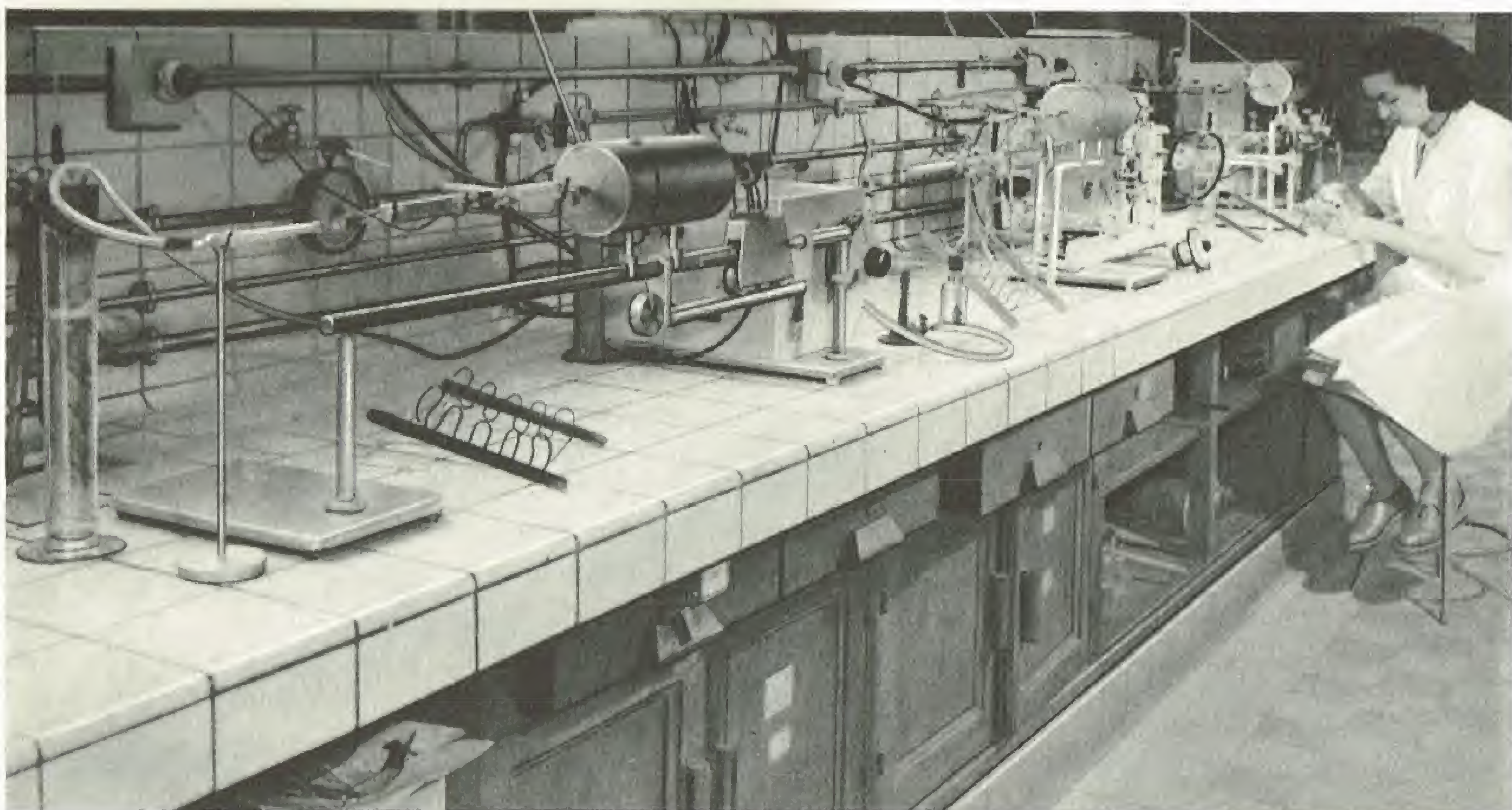
Cuando un sistema está alejado de las condiciones en las cuales se manifiestan las reacciones de equilibrio, **tiende** *a provocar la reacción que desprende la cantidad de calor máxima.*

En la práctica, hay un gran número de reacciones espontáneas que son exotérmicas. Citemos: la neutralización de los ácidos por las bases, las combustiones, el desplazamiento del yodo y el bromo de los yoduros y los bromuros por el cloro, etc.; tal como lo había concebido Berthelot, el principio ha sido muy útil para la previsión de las reacciones.

Por otra parte, además de la consideración restrictiva relativa a las zonas de equilibrio, hay ciertos casos en los que tampoco se cumple el principio. Así, a consecuencia de la existencia de falsos equilibrios, puede ocurrir que una serie de reacciones sucesivas se detenga antes de que el sistema haya sufrido la transformación correspondiente al desprendimiento de calor máximo. (Una piedra puede igualmente cesar de rodar en una pendiente a causa de los rozamientos cada vez mayores.)

Xavier Martínez Garaycordóbil

Aparato de Bernières para los ensayos de combustión, controlados por Lavoisier. Diversas substancias están sometidas a la acción de los rayos solares concentrados por un enorme lente (formado por dos cristales abombados dejando entre sí un espacio lleno de alcohol)



Batería de aparatos de microdosificación automática del carbón y el hidrógeno (*Fot. Larousse*)

Química mineral

Metaloides

Clasificación - Hidrógeno

Clasificación. — La clasificación de los cuerpos simples en metales y metaloides, clásica en química, se funda en una diferencia de las propiedades físicas, mecánicas y químicas de aquéllos.

A la temperatura ordinaria, los metaloides pueden presentarse en uno cualquiera de los tres estados físicos: gaseoso, líquido o sólido. En este último caso, en general no poseen brillo metálico, y conducen mal el calor y la electricidad. Tampoco poseen los caracteres mecánicos de maleabilidad, ductilidad, tenacidad..., que permiten trabajar los metales en bruto.

Desde el punto de vista químico, son esencialmente electronegativos, es decir, sus átomos captan fácilmente los electrones suplementarios requeridos para saturar su capa exterior. Así, se combinan generalmente con el hidrógeno, y no constituyen el catión en las electrólisis. En fin, sus óxidos son anhídridos de ácidos, y nunca óxidos básicos.

Los metaloides se clasifican según su valencia. Vamos a estudiar en primer lugar el hidrógeno, que constituye el elemento de comparación; en cuanto a los demás, los agruparemos en cinco grupos:

Metaloides *monovalentes*, o halógenos,: flúor, cloro, bromo, yodo;

Metaloides *bivalentes*: oxígeno, azufre, selenio, telurio;

Metaloides *trivalentes* del grupo del *nitrógeno*: nitrógeno, fósforo, arsénico, antimonio;

Metaloide *trivalente* del grupo del *boro*: boro;

Metaloides *tetravalentes*: carbono, silicio.

La experiencia enseña que los elementos de un mismo grupo, que naturalmente dan lugar a combinaciones de fórmulas semejantes, presentan grandes analogías entre sí.

Algunos de estos elementos (arsénico, antimonio, silicio, boro) poseen ciertas propiedades características de los metales, por lo que se les conoce también con el nombre de semimetales.

Estudiaremos estos metaloides en el orden que acabamos de exponer, y a este estudio incorporaremos la descripción de los gases raros cuando tratemos del aire, del que forman parte.

Hidrógeno (H = 1,008)

Reseña histórica. — Observado por **Paracelso** (s. XVI) como un gas que se escapa cuando se trata el hierro con ácido sulfúrico diluido, el hidrógeno fue aislado y reconocido por **Cavendish** (1776), quien lo denominó "aire combustible". A la luz de los trabajos de **Lavoisier** sobre la composición del agua, se le dio el nombre de hidrógeno (*hidrogenium*, que produce agua).

Propiedades físicas. — El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro e insípido; es el más ligero de todos los cuerpos conocidos; su densidad con respecto al aire es 0,07. Atraviesa fácilmente las paredes porosas, propiedad característica de los gases ligeros; se difunde igualmente a través de ciertos metales calentados al rojo (platino, hierro), y del caucho.

Es el gas más difícil de licuar, después del helio; hierve a 20° absolutos (o sea aproximadamente — 253° C) a la presión atmosférica; a la temperatura ordinaria, su comportamiento se aproxima mucho al de los gases ideales.

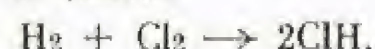
Es muy poco soluble en el agua, y muy soluble, en frío, en el paladio, que al disolverlo aumenta de volumen.

Es relativamente buen conductor del calor y de la electricidad (de todos los gases es el que presenta la mayor conductividad), lo que le emparenta con los metales.

Propiedades químicas. — El hidrógeno es poco activo en frío; en cambio, en presencia de catalizadores, en caliente, o en estado naciente, se combina con la mayor parte de los metaloides y con algunos metales.

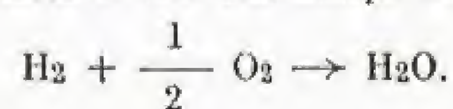
Su afinidad particular por el oxígeno y los halógenos hace que se le incluya a veces entre los metales, con los que presenta numerosas analogías químicas.

1° Se combina directamente con los cuatro *halógenos*, para dar los hidrácidos FH, ClH, BrH, IH, con desprendimientos de calor decrecientes. La acción sobre el flúor presenta carácter explosivo a — 250° C; la combinación con el cloro es explosiva a la luz del sol; con el bromo y el yodo, las reacciones tienen lugar solamente en caliente, y la última se encuentra además limitada por la reacción inversa. La acción del hidrógeno sobre el cloro se escribe



$$H_2 + Cl_2 \longrightarrow 2ClH.$$

2° Una mezcla de hidrógeno y *oxígeno* o aire estalla al ponerla en contacto con una llama o con una chispa eléctrica:



$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow H_2O.$$

El hidrógeno arde en el aire, con una llama poco visible, dando agua (*fig.* 4). Esta reacción se utiliza en el soplete oxhídrico, empleado para la soldadura autógena y para cortar metales.

La combustión del hidrógeno y el oxígeno se produce también en frío en presencia de un catalizador, tal como la esponja de platino o el paladio.

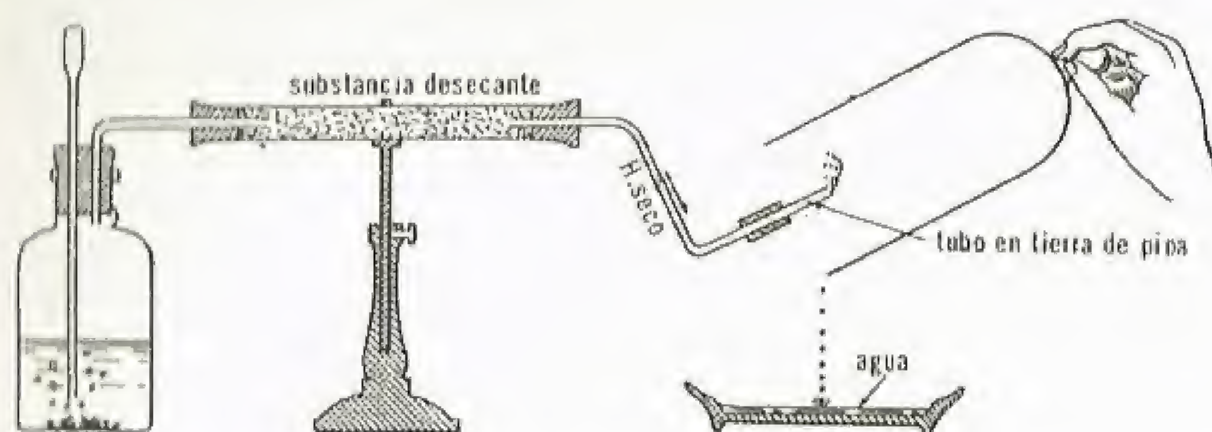


Fig. 4. — La combustión del hidrógeno en el aire produce agua

3° El hidrógeno se combina con otros *metaloides*: con el azufre da, por una reacción reversible a 300° C, sulfuro de hidrógeno, SH_2; con el nitrógeno, a 600° C y a presión, amoníaco, NH_3 (v. p. 274); con el carbono, metano, CH_4, hacia 1 200° C, y acetileno, C_2H_2, en el arco eléctrico (síntesis de Berthelot).

4° El hidrógeno se combina en caliente con los *metales* alcalinos y alcalinotérreos: los hidruros obtenidos, NaH, KH, CaH_2, se descomponen por el agua con desprendimiento de hidrógeno:



$$CaH_2 + 2H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2 + 2H_2.$$

5° El hidrógeno, ávido de cloro y de oxígeno, puede substraer estos elementos de sus combinaciones, diciéndose entonces que las *reduce*. Las reducciones o las hidrogenaciones (fijación de hidrógeno) pueden tener lugar en diferentes circunstancias:

a) Por contacto, *en caliente*: el fluoruro y el cloruro de plata se transforman en plata metálica; los óxidos de azufre, de nitrógeno y de arsénico se reducen, y el metaloide queda libre; el anhídrido carbónico conduce a la reacción reversible



$$CO_2 + H_2 \Longleftrightarrow CO + H_2O;$$

los óxidos de cobre, plomo, níquel, hierro y cinc se reducen al estado metálico:



$$CuO + H_2 \longrightarrow H_2O + Cu;$$

los óxidos alcalinos, alcalinotérreos, de magnesio, manganeso, cromo y aluminio son irreductibles;

b) Por contacto, en presencia de un *catalizador*: el níquel y el cobre reducidos (obtenidos por acción del hidrógeno sobre sus óxidos) favorecen numerosas hidrogenaciones.

La hidrogenación catalítica del carbono, en forma de hulla o de óxido de carbono, permite la fabricación de carburantes sintéticos y de metanol;

c) Por el *hidrógeno naciente* o atómico: ciertas hidrogenaciones, imposibles con el hidrógeno ordinario, se producen cuando se coloca la substancia que se quiere reducir en el seno del líquido que produce el hidrógeno (ácido clorhídrico y cinc, amalgama de sodio y agua); los compuestos oxigenados del azufre, del nitrógeno y del arsénico se transforman así parcialmente en hidruros (SH_2, NH_3, AsH_3).

Masa atómica. — El estudio de la composición del agua (v. pág. 266) arroja el valor 1,008 para la masa atómica del hidrógeno.

Estado natural. — El hidrógeno existe en la atmósfera en cantidad muy reducida (1/10 000 en volumen); constituye el elemento preponderante en las estrellas jóvenes y en las nieblas planetarias. Se encuentra igualmente en estado libre en el interior de la Tierra, de donde se escapa a través de los volcanes. En estado combinado, constituye uno de los elementos más corrientes. Entra en la constitución del agua y de numerosas substancias orgánicas.

Preparación industrial. — Generalmente se le extrae del agua H_2O por *reducción* o por *electrólisis*; se le retira igualmente de diferentes mezclas gaseosas: gas natural, gas de cracking de los petróleos, gas de horno de coque.

Reducción. Extracción del H del gas de agua. — Habitualmente, se reduce el vapor de agua mediante carbón calentado al rojo; esta operación conduce a la formación del *gas de agua*, mezcla de hidrógeno y óxido de carbono, utilizado como combustible gaseoso (*figura* 5):



$$C + H_2O \longrightarrow CO + H_2.$$

A continuación, se separa el óxido de carbono, ya por licuación fraccionada (procedimiento *Claude*), ya oxidándolo por un exceso de vapor de agua, en presencia de un catalizador apropiado (procedimiento *Haber*).

En efecto, al ponerse en contacto con óxido de hierro, el vapor de agua y el óxido de carbono dan una mezcla de anhídrido carbónico e hidrógeno:



$$CO + H_2O \Longleftrightarrow CO_2 + H_2.$$

El anhídrido carbónico formado se disuelve en el agua a presión, o bien se licúa la mezcla.

Descomposición del vapor de agua por un metal. — Se emplea también la *reducción del vapor de agua por el hierro*:



$$3Fe + 4H_2O \longrightarrow Fe_3O_4 + H_2.$$

Se recoge el hidrógeno, mientras que el óxido de hierro es reducido por el óxido de carbono, para regenerar el hierro:



$$4CO + Fe_3O_4 \longrightarrow 4CO_2 + 3Fe.$$

El óxido de carbono requerido para esta operación procede ya del gas pobre, ya del gas de agua, ya del gas de alumbrado, ya del gas de horno de coque.

Electrólisis. — Puesto que el agua conduce mal la corriente eléctrica, para realizar su electrólisis se utiliza una solución (de 10 a 25%) de *sosa* NaOH, de *potasa* KOH, o de *carbonato potásico* CO_3K_2. Estos cuerpos permiten el empleo de electrodos de hierro.

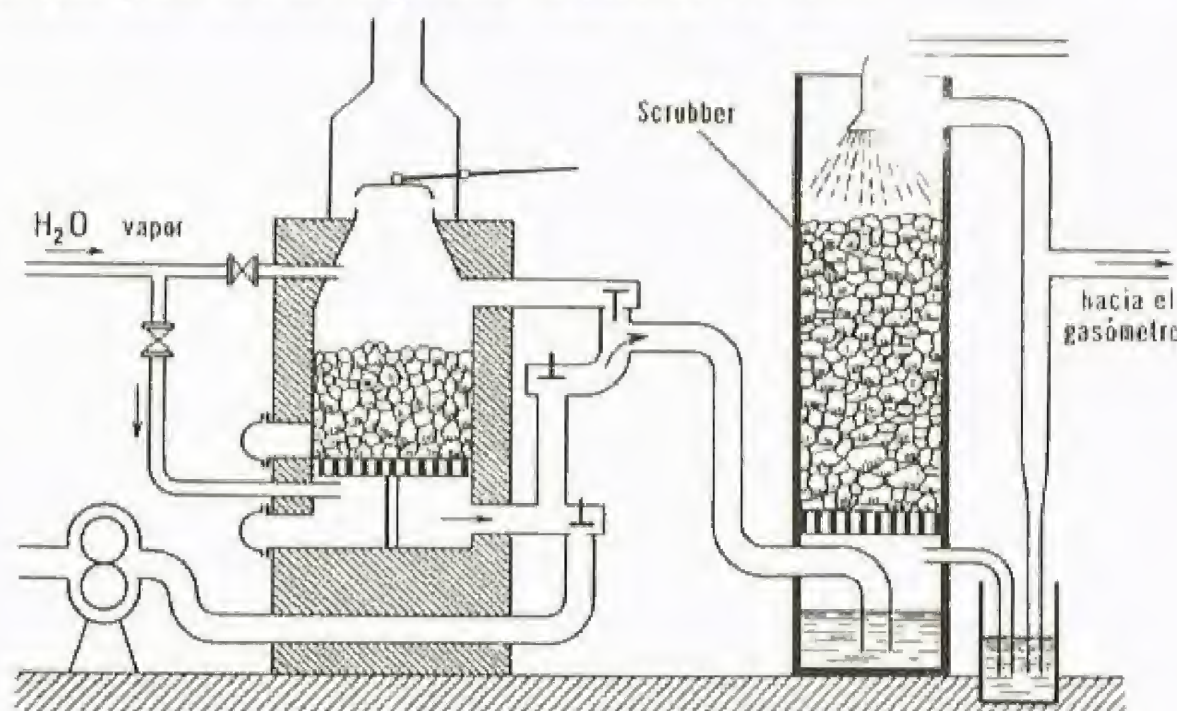
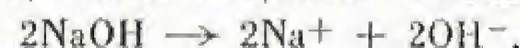
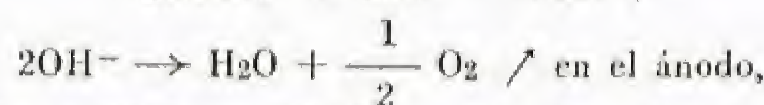


Fig. 5. — Aparato para la producción del gas de agua

Las reacciones secundarias entre los iones y el agua hacen que las substancias disueltas se regeneren íntegramente, de manera que, en definitiva, la reacción total conduce exclusivamente a la descomposición electrolítica del agua; con la sosa, estas reacciones se escriben:



$$2NaOH \longrightarrow 2Na^+ + 2OH^-,$$

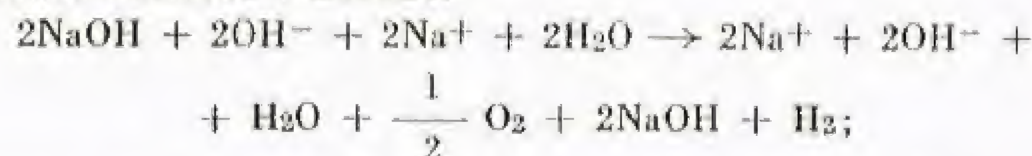


$$2OH^- \longrightarrow H_2O + \frac{1}{2} O_2 \nearrow \text{en el ánodo},$$



$$2Na + 2H_2O \longrightarrow 2NaOH + H_2 \nearrow \text{en el cátodo},$$

y sumando miembro a miembro:



$$2NaOH + 2OH^- + 2Na^+ + 2H_2O \longrightarrow 2Na^+ + 2OH^- + $$
$$+ H_2O + \frac{1}{2} O_2 + 2NaOH + H_2;$$

de manera que, eliminando en los dos miembros los términos comunes, vemos que el conjunto de las reacciones se reduce a la disociación del agua.

Por este procedimiento se obtiene hidrógeno más puro, aunque también más costoso, que por el método precedente; además, se obtiene oxígeno al mismo tiempo.

El hidrógeno se prepara igualmente en la ***electrólisis de los cloruros alcalinos*** (v. pág. 261) como producto secundario.

Tratamiento de los gases de hornos de coque. — Los gases de los hornos de coque, en los que se efectúa la calcinación de la hulla, contienen aproximadamente 50% de hidrógeno en volumen; el 50% restante contiene principalmente metano, anhídrido carbónico, óxido de carbono, nitrógeno y diversos hidrocarburos; se utiliza esta mezcla como combustible (*gas de alumbrado*). El gas natural que acompaña los petróleos, sobre todo en América, y los gases de cracking de los petróleos tienen una composición muy parecida.

Se puede destruir una parte de los hidrocarburos que contienen, y aumentar así la proporción de hidrógeno, calentándolos con vapor de agua en presencia de un catalizador; a continuación, se extrae el hidrógeno y se le purifica. Aumentando la presión y refrigerando la mezcla suficientemente, se licúan todos los gases, excepto el hidrógeno.

Si se pretende realizar ulteriormente la síntesis del amoniaco (lo que constituye el caso más frecuente), no se licúa el nitrógeno.



Fig. 6. — Aparato continuo para la preparación del hidrógeno

Preparación en el laboratorio. — El hidrógeno se encuentra en el comercio comprimido a 150 atmósferas en tubos de acero.

Se le puede preparar en el laboratorio tratando el aluminio o la granalla de cinc con el ácido clorhídrico diluido:



$$Zn + 2ClH \longrightarrow Cl_2Zn + H_2.$$

Para ello se utiliza generalmente un aparato continuo (*fig.* 6).

Aplicaciones. — La aplicación industrial más importante es la síntesis del amoniaco; por otra parte, se emplea el hidrógeno en la industria química para transformar ciertos aceites vegetales, animales o minerales (compuestos no saturados) en grasas compactas, y para la fabricación de carburantes sintéticos, de alcohol de quemar y de determinados disolventes.

Dada su extrema ligereza, se le utiliza para llenar globos.

Recordemos su empleo en el soplete oxhídrico, que tiende a ser reemplazado cada vez más por el soplete oxiacetilénico.

Isótopos del hidrógeno. — Existen dos isótopos del hidrógeno. El hidrógeno pesado o *deuterio*, D = 2, contenido en pequeña proporción en el hidrógeno ordinario, que es el elemento constitutivo del agua pesada, de donde se le extrae. Es dos veces más pesado que el hidrógeno, posee las mismas propiedades químicas que éste y da lugar a combinaciones análogas. El núcleo de su átomo, o *deutón*, sirve a menudo como proyectil en las transmutaciones atómicas.

El otro isótopo, llamado *tritio*, T = 3, se prepara artificialmente en las pilas atómicas, y es radiactivo.

Reconocimiento. — El análisis espectral permite descubrir la existencia incluso de cantidades muy pequeñas de hidrógeno. Éste se pone también de manifiesto al arder en la atmósfera con llama incolora, dando agua.

Metaloides del primer grupo

Flúor: Reseña histórica. Propiedades. Estado natural y preparación. *Ácido fluorhídrico:* Propiedades. Preparación. — **Cloro:** Reseña histórica. Propiedades físicas. Propiedades químicas. Reconocimiento y determinación cuantitativa. Estado natural. Industria del cloro. Preparación en el laboratorio. Aplicaciones. *Ácido clorhídrico:* Reseña histórica. Propiedades físicas. Propiedades químicas. Reconocimiento. Composición. Industria. Preparación en el laboratorio. Aplicaciones. *Compuestos oxigenados del cloro. Cloruros decolorantes:* Propiedades físicas. Propiedades químicas. Preparación industrial. Aplicaciones. *Cloratos y percloratos:* Propiedades. Preparación industrial. — **Bromo:** Reseña histórica. Propiedades físicas. Propiedades químicas. Estado natural. Preparación industrial. Aplicaciones. Reconocimiento. *Ácido bromhídrico:* Propiedades físicas. Propiedades químicas. Reconocimiento. Preparación. *Compuestos oxigenados del bromo.* — **Yodo:** Reseña histórica. Propiedades físicas. Propiedades químicas. Reconocimiento y determinación cuantitativa. Estado natural. Preparación industrial. Aplicaciones e industria. *Ácido yodhídrico.* Propiedades. Preparación. *Compuestos oxigenados del yodo.* — **Astacio:** *Haluros de metaloides*

El *flúor*, el *cloro*, el *bromo* y el *yodo*, llamados *halógenos*, constituyen el grupo (o familia) de los metaloides monovalentes; todos ellos son coloreados en estado gaseoso. Desde el punto de vista químico, presentan propiedades electronegativas muy marcadas, de donde se deriva su gran afinidad con el hidrógeno y los metales. El más importante es el cloro.

Flúor (F = 19)

Reseña histórica. — **Scheele** demostró, en 1771, que el espatoflúor daba con el ácido sulfúrico un cuerpo, el ácido fluorhídrico, que atacaba el vidrio con gran energía, **Davy** admitió que este ácido era una combinación de hidrógeno con un elemento al que dio el nombre de flúor. Después de varias tentativas vanas de numerosos químicos, **Moissan** aisló por vez primera el flúor, en 1886.

Propiedades. — El flúor es un gas amarillo verdoso, de color menos intenso que el cloro.

Se combina con casi todos los elementos, desprendiendo una energía considerable. Su reacción con el hidrógeno, la más importante, es explosiva a — 250° C, temperatura a la que todas las demás actividades químicas no se manifiestan prácticamente. La formación del ácido fluorhídrico



$$H_2 + F_2 \longrightarrow 2FH$$

es particularmente exotérmica, de manera que el flúor destruye todas las combinaciones hidrogenadas en frío; así, con el agua da oxígeno; destruye igualmente los hidrácidos y los hidrocarburos.

Se combina con todos los metales; el oro y el platino no son atacados sino al rojo obscuro.

Se une igualmente con los metaloides, excepto con el cloro y el nitrógeno.

Estado natural y preparación. — Se encuentra en la naturaleza en forma de fluoruros metálicos; los más importantes son la fluorita o espatoflúor, F_2Ca, y la criolita, $F_3Al\ 3FNa$.

Se le sigue preparando actualmente como lo hizo Moissan, por electrólisis de un fluoruro alcalino mezclado con ácido fluorhídrico anhidro, FH, FK, en estado de fusión. En efecto, el ácido fluorhídrico puro no conduce la corriente eléctrica. El recipiente, que forma el cátodo, es de cobre, y el ánodo de níquel. Se emplean estos metales porque el ataque que sufren es sólo superficial.

El flúor sirve desde hace poco tiempo para la fabricación de derivados orgánicos fluorados, tales como el freón, líquido frigorífico, y el teflón, material plástico dieléctrico.

Ácido fluorhídrico (FH)

Propiedades. — El ácido fluorhídrico es un líquido incoloro, que hierve a 20° C; es muy soluble en el agua, forma en la que se le expende en el comercio.

Es un compuesto muy estable, que no se disocia por efecto del calor. Ataca la mayor parte de los metales, y su solución tiene propiedades ácidas. Reacciona con las bases, dando *fluoruros*.

Ataca la sílice y los silicatos según la reacción:



$$SiO_2 + 4FH \longrightarrow SiF_4 + 2H_2O.$$

Esta propiedad da lugar a la aplicación más importante del ácido fluorhídrico, a saber: el grabado del vidrio; además, constituye un método muy fácil para el reconocimiento del mismo.

Preparación. — Se le obtiene por acción del ácido sulfúrico concentrado sobre la fluorita, a temperatura poco elevada:



$$F_2Ca + SO_4H_2 \longrightarrow SO_4Ca + 2FH.$$

Se condensan los vapores obtenidos, o se les disuelve en agua.

Cloro (Cl = 35,457)

Reseña histórica. — El cloro fue obtenido por **Scheele**, en 1774, por acción del espíritu de sal (ácido clorhídrico) sobre el bióxido de manganeso; lo llamó *ácido clorhídrico desflogisticado*. Los autores de la nomenclatura química admitieron que se trataba del ácido muriático más oxígeno (ácido muriático oxigenado). **Gay-Lussac** reconoció que era un cuerpo simple y le dio el nombre de *cloro* (en griego, verde amarillento), que recuerda su color.

Propiedades físicas. — El cloro es un gas verde amarillento, de olor sofocante, muy peligroso si se le respira; su densidad con respecto al aire es 2,5.

Se le licúa fácilmente, en forma de un líquido igualmente verde amarillento, que por enfriamiento ulterior da cristales amarillos. En estado gaseoso, se disuelve bastante en el agua (1 litro de agua disuelve 3 litros de gas a 10° C).

Propiedades químicas. — El cloro es, después del flúor, el elemento más activo de todos los existentes; se combina directamente con la mayor parte de los cuerpos simples (son excepción el flúor, el oxígeno y los gases raros).

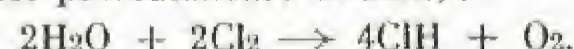
1° Se combina con el *hidrógeno*, dando ácido clorhídrico:



$$H_2 + Cl_2 \longrightarrow 2ClH.$$

La reacción es explosiva a la luz del sol o al contacto de una llama; es lenta a la luz difusa, y casi nula en la obscuridad.

2° El desprendimiento de calor considerable (43,7 kcal.) de la reacción precedente explica por qué el cloro puede destruir numerosas *combinaciones hidrogenadas*. Descompone el vapor de agua al rojo (reacción inversa del procedimiento Deacon):



$$2H_2O + 2Cl_2 \longrightarrow 4ClH + O_2.$$

En frío, por efecto de la luz, se forman lentamente ácido clorhídrico y ácido hipocloroso:



$$Cl_2 + H_2O \longrightarrow ClH + ClOH.$$

La descomposición en ácido clorhídrico y oxígeno se produce totalmente, a la temperatura ordinaria, en presencia de un cuerpo capaz de fijar el oxígeno naciente. Así, la solución sulfurosa se transforma en ácido sulfúrico:



$$SO_2 + H_2O + O \longrightarrow SO_4H_2,$$

y las sales ferrosas en férricas; se puede decir que, de manera general, todos los ácidos en *oso* y las sales en *ito* se oxidan así a un grado superior.

El *poder oxidante* del agua de cloro explica igualmente sus propiedades *decolorantes* (índigo, tornasol), que son las más interesantes en lo que concierne a sus aplicaciones.

Por otra parte, el cloro descompone los hidrácidos halogenados (excepto el FH); destruye el sulfuro de hidrógeno y el amoníaco, razón por la que sirve como desinfectante:



$$4NH_3 + \frac{3}{2} Cl_2 \longrightarrow 3ClNH_4 + \frac{1}{2} N_2.$$

Además, destruye los hidrocarburos en condiciones diversas: el acetileno y la esencia de trementina se inflaman al ponerse en contacto con el cloro.

3º El cloro se combina con todos los *metales*, en presencia de humedad; el sodio, el hierro y el cobre arden en un frasco de cloro, el mercurio es atacado en frío, y el oro se disuelve lentamente en el agua de cloro. Cuando está seco es mucho menos activo, hasta el punto de que, por ejemplo, se pueden utilizar tubos de hierro o acero para el transporte y la conservación del cloro líquido.

Las reacciones sobre los metales de varias valencias conducen siempre al compuesto más clorurado. Se obtienen de esta manera los cloruros Cl_3Al, Cl_3Fe, Cl_4Sn.

4º La afinidad del cloro con los metales permite prever su acción sobre los compuestos metálicos.

Descompone los bromuros y los yoduros, así como numerosos óxidos.

Con la sosa y la potasa, da, en frío y en solución diluida, hipocloritos (agua de Javel, v. p. 262):



$$Cl_2 + 2NaOH \longrightarrow ClNa + ClONa + H_2O;$$

con las soluciones calientes o concentradas, se obtiene un clorato.

Con la cal, da un cloruro básico de calcio (v. p. 262):



$$Ca(OH)_2 + Cl_2 \longrightarrow Cl_2\,OCa + H_2O.$$

5º Se combina con casi todos los *metaloides*.

Por acción directa sobre el azufre, da S_2Cl_2 y SCl_4.

El fósforo y el arsénico se inflaman en el cloro, dando lugar a la formación de PCl_3, PCl_5; $AsCl_3$.

6º Se une con ciertos cuerpos no saturados, los hidrocarburos etilénicos, el anhídrido sulfuroso, el óxido nítrico, el óxido de carbono; se obtienen así por síntesis los cloruros de ácidos SO_2Cl_2, NOCl, $COCl_2$ (fosgeno, gas tóxico).

7º En fin, recordemos las reacciones de substitución que da con los hidrocarburos saturados y con los hidrocarburos bencénicos.

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — En ausencia de otros cuerpos volátiles olorosos, el olfato es capaz de descubrir cantidades muy pequeñas de cloro. El reconocimiento y la determinación cuantitativa precisos se efectúan por su acción sobre una solución de yoduro potásico, que deja el yodo en libertad; la presencia de éste se pone de manifiesto por la coloración azul intensa que comunica al almidón. La determinación cuantitativa se realiza valorando el yodo liberado, equivalente al cloro existente, con tiosulfato (v. p. 262).

Estado natural. — La mayor parte del cloro existente en la naturaleza se halla en forma de cloruros; el más importante es el cloruro sódico o sal marina, ClNa; existen también en yacimientos salinos los cloruros de potasio, ClK, y de magnesio; citemos, en particular, la carnalita

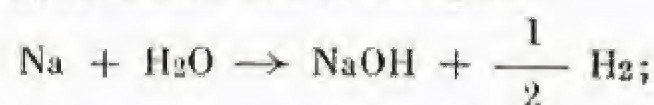


$$Cl_2Mg\ ClK\ 6H_2O,$$

que abunda en las minas de Stassfurt (Alemania).

Industria del cloro. — La materia prima utilizada es el cloruro sódico, del que se extrae el cloro por electrólisis, o liberando el ácido clorhídrico y oxidando ulteriormente éste. Actualmente, los procedimientos electrolíticos son casi los únicos empleados; al mismo tiempo que cloro, producen *sosa*.

1º *Cloro electrolítico.* La electrólisis de las soluciones acuosas de cloruro sódico da lugar a reacciones secundarias: en el cátodo, el sodio reacciona con el agua, dando sosa e hidrógeno:



$$Na + H_2O \longrightarrow NaOH + \frac{1}{2}\ H_2;$$

la sosa se difunde hacia el ánodo, y da con el cloro un hipoclorito o un clorato; por lo tanto, para obtener el cloro, hay que evitar esta reacción secundaria.

(Por el contrario, para obtener los *cloruros decolorantes*, se favorece esta acción del cloro sobre la sosa.)

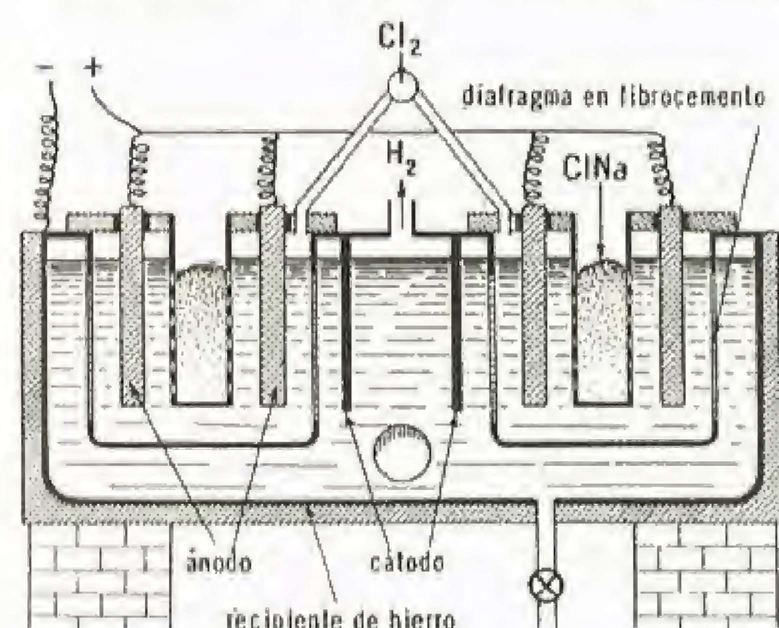


Fig. 7. — Preparación electrolítica del cloro y la sosa

Para obtener el cloro por separado, se sigue el procedimiento de los *diafragmas*.

Se separa en dos compartimientos la cuba electrolítica por un tabique poroso (fibrocemento), que impide la difusión de la sosa sin por ello ofrecer una resistencia excesiva al paso de la corriente (*fig.* 7).

Se utilizan igualmente células de *cátodo de mercurio*.

El sodio liberado da con el cátodo una amalgama que no se descompone por efecto del agua salada mientras la proporción de sodio es relativamente pequeña. La amalgama pasa a las cubas, en donde se descompone, dando sosa y mercurio que vuelve a la cuba electrolítica (*fig.* 8).

El cloro obtenido se licúa y se expende en tubos de acero.

2º El procedimiento *Deacom* utiliza la reacción reversible:



$$4ClH + O_2 \Longleftrightarrow 2H_2O + 2Cl_2.$$

La mezcla de aire y gas clorhídrico purificado llega a 400º C sobre unos ladrillos impregnados de cloruro cúprico Cl_2Cu, que cataliza la reacción. El cloro, demasiado diluido en los gases resultantes, no puede ser licuado; sirve para la fabricación del *cloruro básico de calcio*, o *cloruro de cal* (v. p. 262).

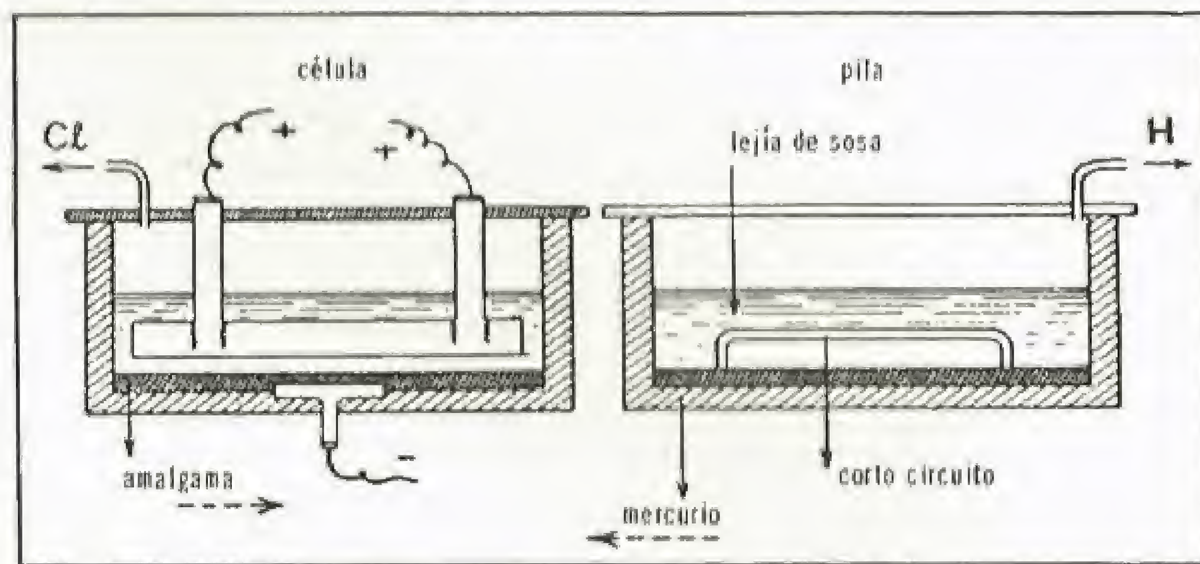
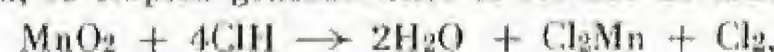


Fig. 8. — Electrolizador Krebbs con cátodo de mercurio para la producción de cloro

Preparación en el laboratorio. — Se oxida la solución comercial de ácido clorhídrico.

Con este fin, se emplea generalmente el bióxido de manganeso:



$$MnO_2 + 4ClH \longrightarrow 2H_2O + Cl_2Mn + Cl_2,$$

calentando ligeramente; se recoge el cloro por desplazamiento.

Se utiliza también como oxidante el cloruro de cal (v. p. 262), que reacciona en frío, o el permanganato potásico.

Aplicaciones. — El cloro sirve en la industria para la fabricación del ácido clorhídrico por síntesis, para la obtención de diversos cloruros metálicos y para la preparación de los cloruros decolorantes y de gran número de disolventes orgánicos.

Se le utiliza igualmente para el blanqueo y la desinfección.

Ácido clorhídrico (ClH)

Reseña histórica. — Conocido desde hace mucho tiempo, se le denominaba primitivamente *ácido muriático*. **Basilio Valentín** lo obtenía por reacción del vitriolo sobre la sal marina; **Glauber** fue el primero en obtenerlo por el procedimiento actual. En 1776, **Cavendish** y **Priestley** lo prepararon en estado gaseoso. **Gay-Lussac, Thenard** y **H. Davy** determinaron su composición exacta.

Propiedades físicas. — Es un gas incoloro, de olor picante, un poco más denso que el aire, bastante fácil de licuar.

Es muy soluble en el agua, que disuelve 500 veces su volumen a 0º C.

Por ebullición, las soluciones forman una mezcla azeotrópica; las que están suficientemente concentradas desprenden cloruro de hidrógeno que forma nieblas en el aire; por esta razón, se llama a la solución saturada *ácido clorhídrico fumante*.

Propiedades químicas. — El ácido clorhídrico, compuesto muy exotérmico, es estable; los metales, el flúor y el oxígeno lo descomponen; por otra parte, es un ácido fuerte.

1º Se disocia solamente a temperaturas muy elevadas, como ha demostrado Sainte-Claire Deville.

2º El flúor y el oxígeno lo descomponen, liberando cloro; con el oxígeno, la reacción sólo tiene lugar al rojo, estableciéndose el equilibrio:



$$4ClH + O_2 \longrightarrow 2Cl_2 + 2H_2O.$$

Los cuerpos oxidantes reaccionan a temperaturas más bajas: el bióxido de manganeso, el permanganato potásico y el cloruro de cal lo descomponen, dejando libre el cloro (véase más arriba).

3º Los metales (excepto el oro y el platino), el silicio y el boro fijan el cloro y liberan el hidrógeno. Los metales alcalinos y alcalinotérreos, el magnesio, el aluminio, el cinc y el hierro son atacados en frío por una solución diluida de ácido clorhídrico:



$$Fe + 2ClH \longrightarrow Cl_2Fe + H_2.$$

En estas reacciones se obtiene la sal menos clorurada, pues el hidrógeno naciente confiere al medio sus propiedades reductoras.

4º El ácido clorhídrico es un ácido fuerte, pues su disociación iónica es muy elevada. Obra sobre los reactivos coloreados, neutraliza las bases dando cloruros, descompone numerosas sales (sulfuros, carbonatos...) y da con los alcoholes ésteres.

Reconocimiento. — Los cloruros son solubles, excepto las sales ClAg, ClHg, ClCu y Cl_2Pb. La insolubilidad del cloruro de plata (soluble en el amoniaco, cianuro potásico y tiosulfato sódico) permite caracterizar el ácido clorhídrico o una de sus sales disueltas.

Para reconocer el cloruro sódico, se le trata con bióxido de manganeso y ácido sulfúrico para liberar el cloro.

Composición. — 1º Gay-Lussac reconoció que el cloro y el hidrógeno se combinan a volúmenes iguales.

2º Se descompone el cloruro de hidrógeno (es decir, el ácido clorhídrico gaseoso) por un metal (estaño) en una campana acodada (*fig.* 9). El volumen de hidrógeno obtenido es igual a la mitad del volumen inicial; por lo tanto, la fórmula es Cl_xH. Comparando las densidades del ácido, del cloro y del hidrógeno, se deduce que $x = 1$.

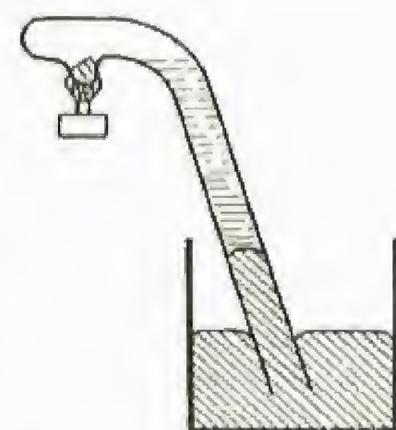
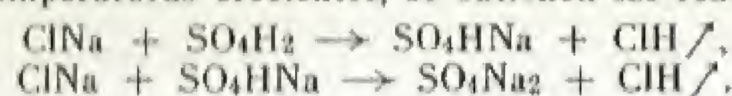


Fig. 9. — Análisis del ácido clorhídrico por el estaño en una campana acodada

Industria. — 1° Se calienta cloruro sódico con ácido sulfúrico concentrado; a temperaturas crecientes, se obtienen las reacciones:



$$ClNa + SO_4H_2 \longrightarrow SO_4HNa + ClH \nearrow,$$
$$ClNa + SO_4HNa \longrightarrow SO_4Na_2 + ClH \nearrow.$$

Antaño se utilizaba este procedimiento para la fabricación del sulfato sódico empleado para la elaboración de vidrios. Desde que el procedimiento *Solvay* se ha generalizado, el producto principal de la reacción es el ácido clorhídrico. La operación se efectúa en hornos de reverbero con solera giratoria (*fig.* 10). Los vapores que salen de los hornos se enfrían y se disuelven en agua.

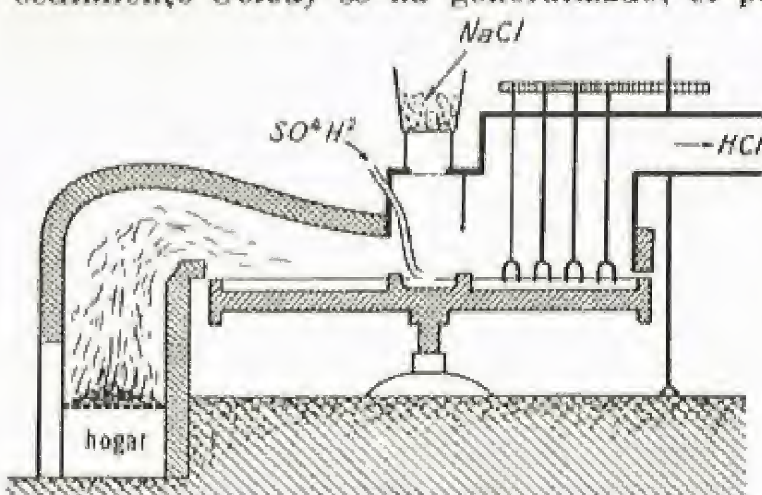


Fig. 10. — Horno Mac Tear de solera giratoria para la preparación de ácido clorhídrico

La solución comercial así obtenida contiene diversas impurezas, especialmente sales de hierro que la coloran de amarillo, y ácido sulfúrico arrastrado por los vapores; en el laboratorio, resulta más fácil obtener ácido puro que eliminar estas impurezas.

2° Se efectúa sobre todo la síntesis industrial:



$$Cl_2 + H_2 \longrightarrow 2ClH,$$

provocando la reacción, en un soplete de cuarzo, de la mezcla gaseosa de hidrógeno y cloro obtenida en la electrólisis del cloruro sódico. El ácido así obtenido es puro.

Preparación en el laboratorio. — 1° Se ponen en contacto cloruro amónico previamente fundido y ácido sulfúrico; la reacción se verifica a temperatura ordinaria:



$$ClNH_4 + SO_4H_2 \longrightarrow ClH + SO_4HNH_4.$$

2° Se deja caer gota a gota ácido sulfúrico en la solución comercial de ácido clorhídrico calentado a 80° C; en estas condiciones, se desprende el gas clorhídrico.

Aplicaciones. — Empleado antaño para la fabricación del cloro, el ácido clorhídrico interviene aún en numerosas preparaciones: cloruros de cinc, de estaño, de amonio, compuestos orgánicos. Sirve para la extracción de la oseína de los huesos y para la producción de la gelatina, para el tratamiento de los fosfatos y de los jabones y melazas, y para el decapado de los metales.

Compuestos oxigenados del cloro

VALENCIA	ANHÍDRIDOS, ÓXIDOS	ÁCIDOS	SALES
I	Cl_2O (monóxido de cloro)	$ClOH$ (ác. hipocloroso)	hipocloritos
III		ClO_2H (ác. cloroso)	cloritos
IV	ClO_2 (dióxido de cloro)		
V		ClO_3H (ác. clórico)	cloratos
VI	Cl_2O_6 (trióxido de cloro)		
VII	Cl_2O_7 (eptóxido de cloro)	ClO_4H (ác. perclórico)	percloratos

El dióxido y el trióxido de cloro (que corresponden a las valencias pares IV y VI) son básicos, mientras que el monóxido y el eptóxido son verdaderos anhídridos, a los que corresponden los ácidos hipocloroso y perclórico.

Todos estos compuestos son inestables, de manera que pueden servir de oxidantes y de clorurantes.

Vamos a estudiar a continuación los más importantes.

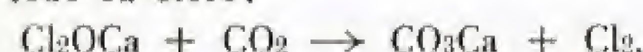
Cloruros decolorantes

Se designa con este nombre las sales del ácido hipocloroso, el *agua de Javel*, solución de hipoclorito sódico, ClONa, que contiene además cloruro sódico, ClNa, y el *cloruro de cal*, al que se atribuye la fórmula Cl_2OCa.

Propiedades físicas. — 1° El agua de Javel es una solución acuosa de cloruro ClNa y de hipoclorito sódico ClONa. Es de color verdoso y desprende olor de cloro.

2° El cloruro de cal es un sólido grumoso blanco amarillento, que huele igualmente a cloro.

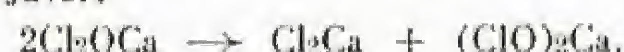
Propiedades químicas. — 1.° Se atribuye al cloruro de cal la fórmula Cl_2OCa, pues al reaccionar con el anhídrido carbónico del aire deja en libertad todo su cloro:



$$Cl_2OCa + CO_2 \longrightarrow CO_3Ca + Cl_2.$$

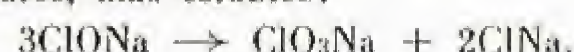
(Esta reacción explica su empleo como desinfectante.)

Se disuelve en el agua, dando la mezcla de cloruro e hipoclorito, análoga al agua de Javel:



$$2Cl_2OCa \longrightarrow Cl_2Ca + (ClO)_2Ca.$$

2° La acción catalítica del cloruro de cobalto descompone los hipocloritos en cloruros y oxígeno; una elevación de la temperatura los transforma en cloratos, más estables:



$$3ClONa \longrightarrow ClO_3Na + 2ClNa.$$

3° Los hipocloritos son oxidantes, sobre todo en medio ácido; oxidan el yodo, el azufre, el fósforo y el ácido clorhídrico, dejando en libertad cloro.

Oxidan también gran número de cuerpos orgánicos, por cuya razón son decolorantes y desinfectantes.

4° Se determina su concentración según el volumen de cloro que dejan en libertad; su determinación cuantitativa se realiza por oxidación del anhídrido arsenioso (empleando índigo como indicador.)

Preparación industrial. — 1° *Cloruro de cal.* Se hace pasar una corriente gaseosa de cloro sobre una capa delgada de cal apagada:



$$Ca(OH)_2 + Cl_2 \longrightarrow Cl_2OCa + H_2O.$$

Se obtiene así un polvo, que contiene también cal apagada y carbonato cálcico.

2° *Hipoclorito sódico.* El agua de Javel resulta de la acción del cloro sobre una solución de sosa diluida y fría:



$$2NaOH + Cl_2 \longrightarrow ClONa + ClNa + H_2O.$$

Ésta es la reacción que se produce en la electrólisis del cloruro sódico si no se separan los electrodos.

Se la prepara también diluyendo cloruro de cal en una solución de carbonato (o de sulfato) sódico:



$$Cl_2OCa + CO_3Na_2 \longrightarrow CO_3Ca + ClNa + ClONa.$$

Después de separar el carbonato cálcico insoluble, se obtiene un líquido amarillo verdoso que contiene las otras dos sales disueltas; los hipocloritos no son cristalizables.

Aplicaciones. — Es más cómodo emplear estos cloruros que el cloro, pues son más manejables y no ofrecen peligro de intoxicación. Se les utilizan para el blanqueo de los textiles y de la pasta de papel, para la desinfección de las aguas residuales, en las coladas domésticas (en donde se les llama lejías), etc.

Se emplean igualmente como antisépticos (tratamiento de las aguas de abastecimiento de las poblaciones).

Cloratos y percloratos

Propiedades. — 1° Los cloratos y percloratos alcalinos se presentan en forma cristalizada, y son más estables que los hipocloritos. Al calentarlos se transforman en cloruros y dejan en libertad el oxígeno (el clorato ClO_3K da primeramente perclorato ClO_4K [v. p. 265]).

2° Estas sales son, pues, unos oxidantes muy enérgicos. En presencia de cuerpos reductores (azufre, carbón, azúcar), forman mezclas que detonan por calentamiento, choque o contacto de ácido sulfúrico. Las *cheditas*, explosivos rompedores, están constituidas por mezclas de cloratos o percloratos y vaselina o parafina (v. EXPLOSIVOS, p. 362).

Sirven también para la fabricación de algunos tipos de cerillas y de ciertos colorantes. Se emplea el clorato potásico como desinfectante, y el sódico para destruir las hierbas perniciosas.

Preparación industrial. — Se preparan los cloratos sódico y potásico por electrólisis de una solución concentrada y tibia del cloruro correspondiente; se forman por la acción del cloro sobre el álcali. Se obtienen al mismo tiempo percloratos.

Bromo (Br = 79,916)

Reseña histórica. — Fue descubierto por **Balard,** en 1826, en el residuo salino procedente de la evaporación del agua del mar. Su nombre (del griego *brômos*, fetidez) recuerda una de sus propiedades físicas.

Propiedades físicas. — El bromo es un líquido de color rojo intenso, muy denso, que emite en frío vapores rojos sofocantes. Es ligeramente soluble en el agua (agua de bromo), soluble en todas las proporciones en el éter, el cloroformo y el sulfuro de carbono.

Propiedades químicas. — Presenta una gran analogía química con el cloro y, como éste, es muy activo.

Se combina al rojo con el *hidrógeno*, dando ácido bromhídrico BrH; el agua de bromo presenta propiedades *oxidantes*; el bromo destruye el sulfuro de hidrógeno, el amoníaco y numerosas materias orgánicas (corcho, caucho).

Ataca la mayor parte de los *metales*, dando bromuros, y se combina en reacción explosiva con el fósforo, formando el tribromuro PBr_3, líquido incoloro, y el pentabromuro PBr_5, sólido amarillo.

Con una solución alcalina diluida, se obtiene bromuro e hipobromito:



$$Br_2 + 2KOH \longrightarrow BrK + BrOK + H_2O,$$

y, con una solución concentrada, bromato BrO_3K:



$$3Br_2 + 6NaOH \longrightarrow 5BrNa + BrO_3Na + 3H_2O.$$

En fin, da lugar, en química orgánica, a numerosos derivados, de substitución o de adición, utilizados para las síntesis.

Estado natural. — Este cuerpo se halla en estado de bromuro en las aguas del mar, en los vegetales marinos y en ciertos yacimientos y fuentes salinas.

Preparación industrial. — La mayor parte del bromo utilizado en Europa procede de Stassfurt (Alemania); las aguas madres resultantes de la extracción de la carnalita (Cl_2Mg ClK $6H_2O$) contienen una cantidad notable de bromuro de magnesio.

Se las trata por el cloro o por la mezcla de Berthollet (SO_4H_2 + + MnO_2); el cloro desplaza el bromo:



$$Br_2Mg + Cl_2 \longrightarrow Cl_2Mg + Br_2.$$

Los vapores de bromo se condensan y se purifican por destilación.

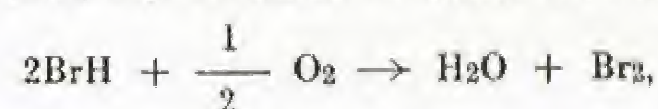
Aplicaciones. — El bromo se emplea mucho en las industrias de los colorantes (derivados del índigo y de la isatina) y de los productos farmacéuticos y fotográficos.

Pero su aplicación principal reside en la industria del tetraetilplomo, antidetonante que se añade a los carburantes.

Reconocimiento. — Se le reconoce por el color rojo y por el olor irritante de sus vapores. Además, se disuelve en el cloroformo y en el éter, tiñéndolos de rojo.

Ácido bromhídrico (BrH)

Propiedades físicas. — Es un gas incoloro, muy soluble en el agua, cuyas soluciones humean en el aire. La solución es al principio incolora, pero tiende ulteriormente al amarillo y luego al rojo, cuando está expuesta al aire; este fenómeno es debido a la reacción:



$$2BrH + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow H_2O + Br_2,$$

en la que se desprende bromo libre.

Propiedades químicas. — Se parece mucho al ácido clorhídrico, pero su estabilidad es menor.

Se disocia fácilmente al elevar la temperatura; el flúor y el cloro en frío, y el oxígeno al rojo, lo destruyen y liberan el bromo.

Ataca fácilmente todos los metales, excepto el oro y el platino.

Al igual que el ácido clorhídrico, es un monoácido fuerte. Sus sales, los *bromuros*, son isomorfas de los cloruros correspondientes.

El bromuro de plata BrAg, insoluble, se disuelve en el tiosulfato sódico; se descompone a la luz, ennegreciéndose; por esta razón, se le utiliza en fotografía, emulsionado en gelatino (gelatinobromuro de plata).

Reconocimiento. — Los bromuros forman con el nitrato de plata un precipitado insoluble de bromuro de plata, blanco amarillento, que se descompone a la luz.

Preparación. — 1° Se puede obtener el ácido bromhídrico enviando una corriente de hidrógeno y vapor de bromo a través de un tubo caliente;

2° Los bromuros de fósforo PBr_3 y PBr_5 se descomponen por el agua:



$$PBr_5 + 4H_2O \longrightarrow PO_4H_3 + 5BrH.$$

Se deja caer el bromo gota a gota en una retorta calentada ligeramente, que contiene agua y fósforo rojo. Se recoge el ácido bromhídrico por desplazamiento, o disuelto en el agua.

Compuestos oxigenados del bromo

Los dos compuestos oxigenados más conocidos: el ácido hipobromoso BrOH, y el ácido brómico BrO_3H, presentan gran analogía con los compuestos de cloro correspondientes; sin embargo, su actividad es menor, por lo que su empleo es restringido.

Yodo (I = 126,91)

Reseña histórica. — Fue descubierto por **Courtois,** en 1811, en las aguas madres de las cenizas de algas marinas; debe su nombre al color de sus vapores (del griego *iôdês*, violeta).

Propiedades físicas. — El yodo se presenta en forma de pajuelas de color violeta, casi negro grisáceo, con brillo metálico. Se funde a 115° C, pero generalmente comienza a sublimarse a temperaturas inferiores, a causa de su elevada tensión de vapor.

La densidad de los vapores de yodo disminuye a medida que se eleva la temperatura; este fenómeno se interpreta por la disociación molecular:



$$I_2 \Longleftrightarrow 2I.$$

Es poco soluble en el agua, y muy soluble en las soluciones de ácido yodhídrico o de yoduros alcalinos; es soluble igualmente en los disolventes orgánicos. Las soluciones a que da lugar son pardas (agua, alcohol, éter) o violetas (cloroformo, sulfuro de carbono). La solución en alcohol es la tintura de yodo, empleada para la desinfección de heridas.

Propiedades químicas. — El yodo se asemeja al cloro y al bromo por sus reacciones con el hidrógeno y los metales, pero se oxida con mayor facilidad que éstos.

Se le puede combinar con el *hidrógeno* calentando la mezcla en un tubo cerrado; la reacción se encuentra limitada por la disociación del gas yodhídrico formado. El agua de yodo presenta un carácter oxidante menos marcado que el agua de cloro o el agua de bromo. El yodo descompone el sulfuro de hidrógeno y ataca las materias orgánicas; en esto radican sus propiedades antisépticas, empleadas corrientemente.

Ataca los *metales* en caliente, dando yoduros; con los álcalis, da una mezcla de yoduro y yodato:



$$3I_2 + 6NaOH \longrightarrow 5INa + IO_3Na + 3H_2O$$

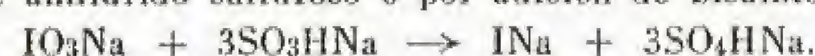
(el hipoyodito, IONa, es inestable).

Los *oxidantes* (agua de cloro, permanganato potásico...) transforman el yodo en ácido yódico, IO_3H.

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — Una muestra de yodo es suficiente para teñir de azul el agua de almidón; esta coloración desaparece al calentar la solución, y vuelve a aparecer al enfriarla. La yodometría se efectúa con una solución valorada de tiosulfato sódico, en presencia de agua de almidón (v. p. 269). Se pueden dosificar de esta manera los oxidantes susceptibles de liberar el yodo del yoduro potásico (cloro, ozono...).

Estado natural. — El yodo se encuentra, en forma de yoduros y yodatos (INa, IO_3Na), en los nitratos de Chile y Perú; existe, igualmente combinado, en las aguas del mar y en los vegetales marinos.

Preparación industrial. — 1° Casi el 80% del yodo comercial se obtiene a partir del yodato sódico que contienen los nitratos de Chile y Perú. Se reduce una parte del yodato al estado de yoduro por una corriente de anhídrido sulfuroso o por adición de bisulfito sódico:



$$IO_3Na + 3SO_3HNa \longrightarrow INa + 3SO_4HNa.$$

En medio ácido, estas sales se conducen como los ácidos correspondientes; el ácido yodhídrico reduce el ácido yódico, y el yodo queda en libertad:



$$IO_3H + 5IH \longrightarrow 3H_2O + 3I_2.$$

Se calcula previamente la cantidad de bisulfito que ha de añadirse para que estos ácidos se encuentren en las proporciones indicadas por la ecuación.

2° Por acción del ácido sulfúrico sobre una mezcla de yoduro potásico y bióxido de manganeso:



$$2IK + MnO_2 + 3SO_4H_2 \longrightarrow 2SO_4HK + SO_4Mn + 2H_2O + I_2.$$

3° El yodo bruto se purifica por destilación doble.

Aplicaciones e industria. — Se utiliza el yodo para la preparación de yoduros de potasio y de mercurio y de la tintura de yodo, y para la síntesis de numerosos productos orgánicos.

Chile produce 440 t, y se sitúa a la cabeza de todos los países del mundo; en Europa se producen 200 t.

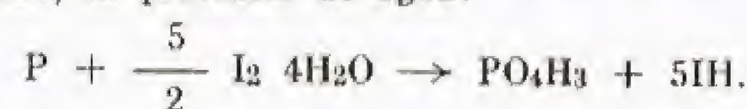
Ácido yodhídrico (IH)

Propiedades. — Gas incoloro, muy soluble en el agua, se disocia fácilmente por el calor. Los otros tres *halógenos* y el *oxígeno* lo destruyen; se le puede hacer arder. Son los oxidantes, se conduce como un reductor enérgico, dando yodo e incluso ácido yódico.

Ataca fácilmente los *metales*, en particular la plata y el mercurio en frío.

Es un monoácido fuerte, que reacciona con las bases para dar los *yoduros*. El yoduro de plata, IAg, es un precipitado amarillo, soluble en el tiosulfato sódico.

Preparación. — 1° Se provoca, en caliente, la reacción del fósforo sobre el yodo, en presencia de agua:



$$P + \frac{5}{2} I_2 \; 4H_2O \longrightarrow PO_4H_3 + 5IH.$$

2° Por acción del ácido fosfórico sobre el yoduro potásico:



$$PO_4H_3 + IK \longrightarrow PO_4H_2K + IH.$$

Compuestos oxigenados del yodo

VALENCIA	ANHÍDRIDO	ÁCIDOS, BASES	SALES
I		IOH (ac. hipoyodoso)	hipoyoditos
III		I(OH)$_3$ (base inestable)	sales de yodo trivalente
V	I_2O_5 (pentóxido de yodo)	IO_3H (ac. yódico)	yodatos
VII		IO_6H_5 (ac. peryódico)	peryodatos

Estos compuestos ofrecen menos importancia que los correspondientes de cloro. Obsérvese que el compuesto de yodo trivalente, que no existe en libertad, presenta carácter básico, y no ácido, como se hubiera podido esperar; así, da lugar a sales del tipo $(CH_3COO)I$, etc., en las que el yodo entra como catión.

Astacio (At = 210)

Los primeros estudios sobre el astacio (del griego, inestable) datan del año 1940 (Segré).

Se le conoce sobre todo por sus propiedades radiactivas, y como elemento de síntesis y radioelemento natural.

Se han descubierto diez isótopos de la pléyade, cuyas masas atómicas varían de 207 a 218; los períodos correspondientes oscilan entre 1/10 000 de segundo y 7,5 horas.

Haluros de metaloides

Los halógenos se pueden combinar entre sí, o con otros metaloides. La estabilidad de estos compuestos es variable, aunque, en términos generales, se puede decir que rara vez es grande. En cuanto a su nomenclatura, se considera que es el halógeno más electronegativo el que forma el haluro correspondiente. Así, los compuestos F_5I, F_3Br, BrI, Cl_3N... se denominan respectivamente: pentafluoruro de yodo, trifluoruro de bromo, bromuro de yodo, tricloruro de nitrógeno.

Las aplicaciones de los haluros de halógenos son muy limitadas. De los haluros de los demás metaloides, merecen ser citados el tricloruro de nitrógeno, Cl_3N, líquido amarillo, muy explosivo, y, sobre todo, el tetracloruro de carbono, Cl_4C, líquido incoloro, muy buen disolvente de las grasas, que ofrece sobre la mayor parte de los otros productos comerciales la ventaja de no ser inflamable.

Metaloides del segundo grupo

Oxígeno: Reseña histórica. Propiedades físicas. Propiedades químicas. Oxidaciones y reducciones. Reconocimiento y determinación cuantitativa. Masa atómica. Estado natural. Industrias del oxígeno. Extracción del aire. Electrólisis del agua. Preparación en el laboratorio. Aplicaciones. *Ozono:* Reseña histórica. Propiedades físicas. Propiedades químicas. Estado natural. Preparación. Reconocimiento. *Agua pura:* Reseña histórica. Preparación. Propiedades físicas. Propiedades químicas. Composición del agua. Masa atómica del hidrógeno. Reconocimiento. *Aguas naturales:* Substancias contenidas en el agua. Aplicaciones. Agua potable. *Agua pesada. Peróxido de hidrógeno. Agua oxigenada:* Reseña histórica. Propiedades físicas. Propiedades químicas. Preparación. Reconocimiento. — **Azufre:** Reseña histórica. Propiedades físicas. Propiedades químicas. Estado natural. Obtención. Aplicaciones. *Compuestos oxigenados del azufre. Anhidrido sulfuroso, ácido sulfuroso y sulfitos:* Propiedades físicas. Propiedades químicas. Composición. Estado natural. Preparación industrial. Preparación en el laboratorio. Aplicaciones. *Sulfitos:* Propiedades. Preparación. Reconocimiento. *Anhidrido sulfúrico:* Propiedades. Preparación. Aplicaciones. *Ácido sulfúrico.* Reseña histórica. Propiedades físicas. Propiedades químicas. Reconocimiento y determinación cuantitativa. Preparación industrial. Procedimiento de contacto. Procedimiento de las cámaras de plomo. Aplicaciones. *Sulfatos. Peroxiácidos del azufre:* Ácido monopersulfúrico. Ácido peroxidisulfúrico. *Compuestos con varios átomos de azufre:* Ácido tiosulfúrico. Tiosulfatos. Propiedades. Preparación. Ácido hiposulfuroso. Hiposulfitos. Ácido hiposulfúrico. Hiposulfatos. Ácidos politiónicos. Politionatos. *Sulfuro de hidrógeno o ácido sulfhídrico.* Reseña histórica. Propiedades físicas y fisiológicas. Propiedades químicas. Estado natural. Preparación. Determinación cuantitativa — **Selenio:** Reseña histórica. Propiedades. Estado natural. Reconocimiento y determinación cuantitativa. — **Telurio:** Reseña histórica. Propiedades. Estado natural. Reconocimiento y determinación cuantitativa

Oxígeno (O = 16)

Reseña histórica. — El oxígeno fue descubierto en 1772 por **Priestley**, que lo obtuvo calentando óxido de mercurio. **Lavoisier** demostró más tarde que este gas era uno de los constituyentes del aire y que gracias a él tenían lugar las combustiones y la respiración. Le dio el nombre de *oxígeno* (del griego, *oxus*, ácido, y *gennao*, produce), pensando que este elemento forma la parte esencial de todos los ácidos. A la luz del descubrimiento del oxígeno, se vino abajo la teoría del flogisto, que pretendía que en toda combustión se desprendía la substancia combustible, el flogisto.

Propiedades físicas. — El oxígeno es un gas incoloro, inodoro e insípido; se disuelve muy poco en el agua. Es un poco más denso que el aire (D = 1,105). Se licúa difícilmente, y hierve a la presión atmosférica a — 183° C. Se solidifica a — 218,5° C.

Propiedades químicas. — El oxígeno se combina con gran número de elementos; el desprendimiento de calor es tal que, a veces, los cuerpos reactivos se ponen incandescentes. Estas reacciones se llaman *combustiones*; se pueden producir a temperaturas elevadas, ser rápidas e ir acompañadas por una emisión de luz (combustiones vivas), o tener lugar en frío, a velocidad reducida (combustiones lentas); en este caso, el desprendimiento de calor producido es compensado por el enfriamiento debido al medio ambiente, y la temperatura no se eleva sensiblemente.

1° El *hidrógeno* arde en una atmósfera de oxígeno, o de aire (v. pág. 258).

2° Todos los *metales*, excepto el oro y el platino, son atacados por el oxígeno a diferentes temperaturas; estas reacciones originan óxidos, de los que por lo menos uno manifiesta propiedades básicas. Así, el sodio, el magnesio y el hierro arden en el oxígeno con incandescencia y dan lugar a los óxidos Na_2O, MgO, Fe_3O_4.

El cobre y el hierro sufren combustiones lentas cuando están expuestos al aire, pero el vapor de agua y el anhídrido carbónico de la atmósfera intervienen en las reacciones: en estas condiciones, se forman cardenillo y orín. El aluminio se cubre en el aire de una capa muy fina de óxido, que le protege de todo ataque ulterior.

3° Todos los *metaloides* se combinan con el oxígeno; entre los óxidos obtenidos, hay por lo menos uno que es anhídrido de ácido.

El azufre, el fósforo, el carbono, el silicio y el boro arden con incandescencia, dando los anhídridos SO_2, P_2O_5, CO_2, SiO_2, B_2O_3, con desprendimientos de calor crecientes.

El carbono y el fósforo sufren también una combustión lenta; la última va acompañada de fosforescencia y origina el anhídrido fosforoso, P_2O_3.

4° Las *combinaciones* formadas por elementos combustibles pueden arder a una temperatura determinada. El alcohol, los hidrocarburos (gas de alumbrado, petróleo, benzol), los ácidos grasos (bujías), que contienen carbono e hidrógeno, son combustibles.

5° La *respiración* es una combustión lenta; el oxígeno, transportado por la sangre hasta las células, destruye ciertas substancias orgánicas, produciendo anhídrido carbónico y agua que pasan a la atmósfera; por otra parte, obran en este mismo sentido todas las demás combustiones que tienen lugar en la Tierra; en estas condiciones, se podría suponer que la atmósfera se va empobreciendo progresivamente de oxígeno; en realidad, la cantidad de oxígeno en la Tierra permanece constante, porque al mismo tiempo que las combustiones tiene lugar el proceso inverso: la asimilación de las plantas devuelve a la atmósfera el oxígeno, regenerado a partir de los productos resultantes de la combustión primitiva. El conjunto de estos procesos constituye el ciclo del oxígeno en la naturaleza.

Oxidaciones y reducciones. — Corrientemente, se dice que la oxidación de un cuerpo consiste en la fijación de oxígeno por este cuerpo; la reducción, transformación inversa, supone el abandono de oxígeno.

Los principales **agentes oxidantes** son:

el oxígeno o el aire, el ozono y el agua oxigenada;

los óxidos o peróxidos poco estables, CuO, MnO_2, CrO_3;

los ácidos o sus sales, ClO_3K, NO_3H;

las sales que se derivan de los peróxidos metálicos, MnO_4K, $Cr_2O_7K_2$;

los halógenos en presencia de agua;

las sales de los metales preciosos, NO_3Ag, Cl_3Au.

Se obtienen, por ejemplo, las reacciones:



$SO_4H_2 + MnO_2 \rightarrow SO_4Mn + H_2O + O$ (mezcla de Berthollet),



$4SO_4H_2 + Cr_2O_7K_2 \rightarrow SO_4K_2 + (SO_4)_3Cr_2 + 4H_2O + 3O.$

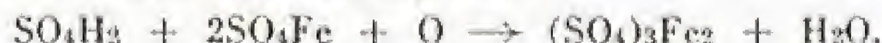
Los principales **reductores** son:

los metaloides y metales oxidables, H, C, Al;

sus combinaciones poco estables, SH_2, IH;

los óxidos suboxigenados y sus sales, CO, SO_2, arsenitos;

las sales en *oso*, sales ferrosas, cuprosas:



$$SO_4H_2 + 2SO_4Fe + O \rightarrow (SO_4)_3Fe_2 + H_2O.$$

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — Se puede poner de manifiesto la presencia de oxígeno porque reaviva la llama de un pedazo de madera que presente un punto de ignición. Se reconoce la existencia de vestigios de oxígeno por la facultad que tienen de teñir de rojo una solución de sulfato ferroso y pirocatequina. La determinación se efectúa absorbiendo en frío por el fósforo blanco o por el ácido pirogálico en presencia de potasa, o en caliente por el cobre o el sulfuro de bario, SBa, que se transforma en sulfato, SO_4Ba.

Masa atómica. — Por definición, ha sido fijada exactamente a 16.

Estado natural. — El oxígeno es uno de los cuerpos simples más corrientes en la naturaleza: entra en la constitución del aire y del agua, de los silicatos y de los carbonatos, que forman la mayor parte de la corteza terrestre; por último, casi todas las combinaciones orgánicas contienen igualmente oxígeno.

Industrias del oxígeno. — El oxígeno se origina como producto secundario en la fabricación del nitrógeno y del hidrógeno; en efecto, se le extrae del aire o del agua.

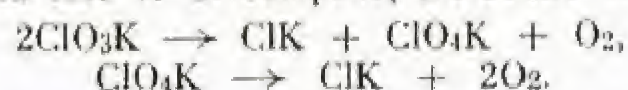
Extracción del aire. — *Método de Linde.* Se efectúa la licuación del aire y se procede a la destilación fraccionada del aire líquido en una columna de platos (v. p. 273); se logra separar así el oxígeno líquido (— 183° C) del nitrógeno gaseoso (que se licúa a — 195° C).

Esta fabricación ha adquirido gran importancia desde que se fabrica amoniaco por síntesis industrial a partir del hidrógeno y del nitrógeno.

Electrólisis del agua. — Se obtiene el oxígeno al mismo tiempo que el hidrógeno por vía electrolítica (v. p. 259).

Preparación en el laboratorio. — Como producto comercial, se presenta el oxígeno encerrado en tubos de acero. Se le puede preparar en cantidades pequeñas por uno de los procedimientos siguientes:

1° Descomponiendo en caliente el *clorato potásico*. Normalmente, esta operación ocurre en dos fases sucesivas, la primera de las cuales desprende un poco de oxígeno y forma al mismo tiempo el perclorato, que en la segunda fase se descompone, liberando el oxígeno:



$$2ClO_3K \rightarrow ClK + ClO_4K + O_2,$$
$$ClO_4K \rightarrow ClK + 2O_2.$$

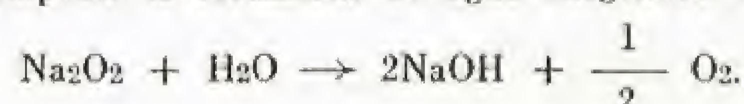
Estas reacciones pueden presentar carácter explosivo, por lo que hay que tomar las precauciones oportunas a fin de evitar los posibles accidentes. Con tal fin, se añade bióxido de manganeso al clorato; la acción catalítica que ejerce éste regula la reacción, que entonces se efectúa en una sola fase:



$$2ClO_3K \rightarrow 2ClK + 3O_2.$$

El oxígeno, poco soluble, se recoge en una cuba de agua (*fig.* 11);

2° Se descompone por el agua, en frío, la *oxilita*. Este cuerpo contiene sobre todo bióxido de sodio, Na_2O_2, y un poco de sulfato de cobre (destinado a impedir la formación de agua oxigenada):



$$Na_2O_2 + H_2O \rightarrow 2NaOH + \frac{1}{2} O_2.$$

Como la sosa formada es susceptible de absorber el anhídrido carbónico producido por la respiración, se utiliza la oxilita para regenerar la atmósfera en las minas y los submarinos.



Fig. 11. — **Preparación del oxígeno por el clorato potásico y el bióxido de manganeso**

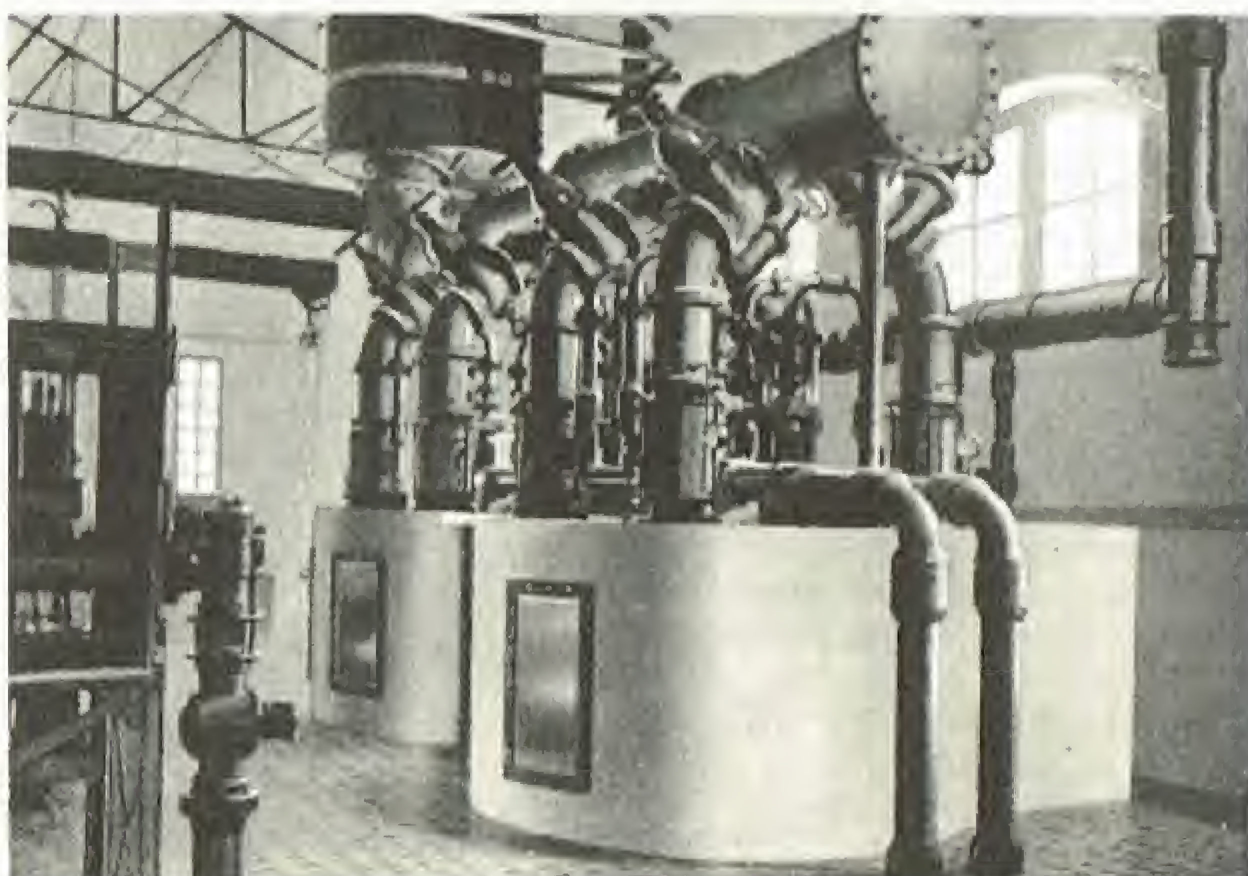
Aplicaciones. — Se emplea el oxígeno en los sopletes oxhídrico y oxiacetilénico, en los altos hornos y en terapéutica (asfixias, ascensiones a altitudes elevadas). Se le emplea también como oxidante en la obtención del ácido nítrico y en la fabricación de los explosivos a base de *aire líquido*.

Ozono (O_3)

Reseña histórica. — En 1785, **Van Marun** notó que, al saltar una chispa eléctrica en una atmósfera de oxígeno, se originaba un gas de olor característico, que tenía la propiedad de hacer perder el brillo al mercurio. Las mismas observaciones fueron repetidas y estudiadas por **Schoenbein,** que dio al nuevo principio el nombre de *ozono* (en griego, *yo huelo*) y estudió sus propiedades principales. Los trabajos de **Marignac, La Rive, Soret, Riesenfeld** y **Schwab** han permitido fijar su constitución y obtenerlo en estado puro.

Propiedades físicas. — El ozono es una variedad molecular del oxígeno. En las condiciones ordinarias, se le puede obtener solamente en una proporción muy pequeña, mezclado con el oxígeno.

El ozono es un gas de color azul pálido, muy oloroso incluso a gran dilución; en este estado es refrescante, pero al aumentar su concentración resulta corrosivo. Su densidad es $\frac{3}{2}$ mayor que la del oxígeno, por lo que se le ha atribuido la fórmula O_3.



Esterilización del agua por el ozono (Fábrica de alimentación de la Riviera)

Enfriando el ozono gaseoso, se obtiene un líquido azul negruzco, muy inestable, miscible en proporción limitada con el oxígeno líquido; por ulterior enfriamiento, forma cristales de color violeta negruzco.

Propiedades químicas. — 1° El ozono es inestable a la temperatura ordinaria; se descompone al calentarlo tenuemente, e igualmente es destruido por los cuerpos pulverulentos (polvo de las ciudades), dando oxígeno.

2° El ozono es un oxidante muy enérgico; una molécula de ozono origina una molécula de oxígeno inactivo y un átomo activo que se fija en el cuerpo oxidable, de acuerdo con el esquema:



$$O_3 \rightarrow O_2 + O \text{ activo.}$$

Provoca en frío la oxidación de numerosos metales (mercurio, plata), del yodo, que se transforma en anhídrido yódico, y del anhídrido arsenioso (ozonometría). Oxida también el yoduro potásico:



$$2IK + O_3 + H_2O \rightarrow I_2 + 2KOH + O_2;$$

el yodo así liberado colorea de azul el almidón, por lo que esta reacción sirve para el reconocimiento del ozono.

Destruye por oxidación numerosas substancias orgánicas y manifiesta un gran poder decolorante y bactericida, por lo que se le utiliza para esterilizar las aguas y purificar el aire.

3° Con los cuerpos orgánicos no saturados da compuestos de adición poco estables, llamados *ozónidos*. Estas combinaciones forman líquidos espesos, fácilmente explosivos.

Estado natural. — El ozono se encuentra en pequeñas cantidades en la baja atmósfera, en donde se forma a consecuencia de los efluvios eléctricos. Existe también en las capas más elevadas de la atmósfera, aproximadamente a 60 km de altitud, en donde es engendrado por las radiaciones solares ultravioleta; absorbe la mayor parte de estas radiaciones, que harían la vida imposible en la superficie de la Tierra si llegasen a alcanzarla.

Preparación. — 1° Se prepara el ozono haciendo pasar una corriente de oxígeno entre las armaduras de un condensador eléctrico, unidas a los polos de una bobina de inducción. El *efluvio* que se produce a través del oxígeno lo ozoniza parcialmente; se obtiene así una mezcla que contiene de 5 a 10% de ozono. El aparato utilizado en los laboratorios es el ozonizador de Berthelot (*fig.* 12).

2° A temperatura elevada, el oxígeno se transforma parcialmente en ozono, de acuerdo con la reacción de equilibrio:

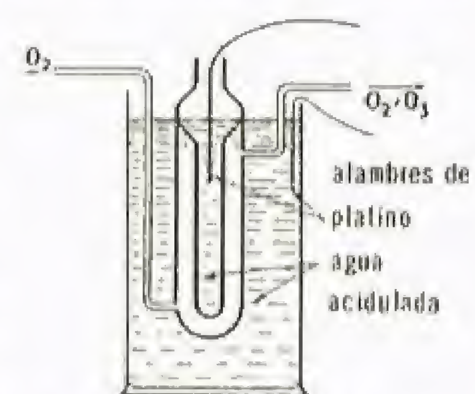


Fig. 12. — **Ozonizador de Berthelot**



$$3O_2 \rightleftarrows 2O_3 - 60 \text{ kcal};$$

ésta es la razón por la que las chispas eléctricas ozonizan el aire.

3° Por destilación fraccionada de mezclas líquidas de oxígeno y ozono, se ha llegado a obtener ozono casi puro (a 98%).

4° Por electrólisis de una solución acuosa de ácido sulfúrico se obtiene, utilizando un ánodo de platino, un desprendimiento de ozono junto al oxígeno.

Reconocimiento. — Se le reconoce bien por la reacción con el IK y almidón, antes citada. Más característica es aún la reacción del papel embebido en una solución de tetrametildiamidodifenilmetano en alcohol que, en presencia de ácido acético, da con el ozono una coloración violeta.

Agua pura (H_2O)

Reseña histórica. — El agua era considerada como un elemento por los antiguos e incluso por **Cavendish,** que había reconocido, en 1781, su formación en la combustión del hidrógeno. Posteriormente, **Lavoisier** demostró que se trataba de un cuerpo compuesto, realizando su análisis por acción del hierro al rojo. Su composición volumétrica fue determinada por **Gay-Lussac** (1805), y su composición gravimétrica por **Dumas** (1843).

Preparación. — Las aguas naturales, que estudiaremos más adelante, son diferentes unas de otras; sin embargo, se puede extraer de todas ellas una substancia idéntica en todos los casos: la especie química *agua pura*.

1° Se obtiene el agua pura por destilación, es decir, por evaporación y condensación inmediata de las aguas naturales. Se utiliza para ello unos aparatos llamados alambiques (*fig.* 13).

Se desechan las porciones recogidas al principio de la operación, que contienen anhídrido carbónico y amoniaco, y se detiene la operación después de haber destilado los tres cuartos del agua, pues la última cuarta parte puede contener ácido clorhídrico procedente de la hidrólisis del cloruro de magnesio.

2° Se puede obtener actualmente agua pura filtrando el agua natural a través de un complejo sintético formado por tres resinas llamadas Wolfatit K, M, P que, sucesivamente, retienen los cationes, los aniones y neutralizan el producto resultante.

Propiedades físicas. — El agua adquiere fácilmente los tres estados: sólido, líquido y gaseoso. Las temperaturas de los cambios de estado sirven para fijar la escala termométrica llamada centesimal. Así, se atribuye el valor 0° C a la temperatura a la que el agua se

solidifica en hielo, y el valor 100° C a aquella en la que tiene lugar la ebullición, en las condiciones normales de presión (760 mm de mercurio).

El agua líquida, incolora cuando el espesor es pequeño, presenta diversas anomalías físicas: en particular, tiene una densidad máxima a 4° C; se explica este fenómeno suponiendo que el agua está constituida por una mezcla de diversas especies químicas, tales como H_2O, $(H_2O)_2$, $(H_2O)_3$... Su densidad a 4° C, convencionalmente igual a 1, sirve como base a la que se refieren las densidades de todos los demás cuerpos.

Tiene un calor específico elevado (1 a 15° C por definición de la caloría).

Al congelarse, el volumen del agua aumenta 1/11; de aquí se deriva su poder rompedor, utilizado antaño para la construcción de caminos y que hoy en día es causa de desmoronamientos en las rocas. El hielo ordinario, que cristaliza en el sistema hexagonal (arborescencias de 6 ramas en la escarcha), es más ligero que el agua, pero, operando a presiones elevadas, se han descubierto nuevas variedades de hielo, más densas que el agua.

El agua es el disolvente por excelencia; todos los gases, y numerosos sólidos y líquidos, se disuelven en ella. Los ácidos, bases y sales se disocian electrolíticamente en su seno.

Propiedades químicas. — 1° El agua es un compuesto muy estable; sin embargo, se ha podido observar su *disociación* en hidrógeno y oxígeno, que, de todas maneras, es muy reducida y sólo tiene lugar por encima de 1 100° C.

2° El agua pura sufre en proporción pequeñísima la *disociación electrolítica*; las moléculas H_2O están parcialmente disociadas en cationes H^+ y en aniones OH^-.

3° En presencia de cuerpos que presenten gran afinidad por el hidrógeno o por el oxígeno, el agua se descompone; en general, el elemento que no se ha fijado al cuerpo causante de la descomposición queda libre.

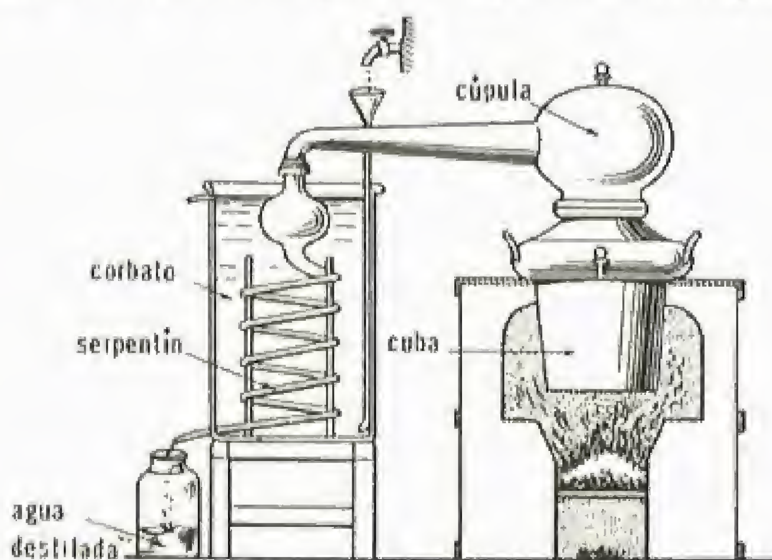


Fig. 13. — Aparato para la destilación del agua

El flúor descompone el agua en frío y fija el hidrógeno originado; igualmente, el cloro y el bromo descomponen el agua al rojo, o en frío en presencia de un cuerpo oxidable (v. p. 260).

La mayor parte de los metales descomponen el agua a temperatura adecuada, combinándose con el oxígeno liberado: los metales alcalinos y alcalinotérreos en frío, el magnesio y el aluminio a 100° C; el hierro y el cinc al rojo, por reacción reversible. Esta acción ha servido para la clasificación de Thenard.

El carbono y el boro, ávidos de oxígeno, obran de igual manera.

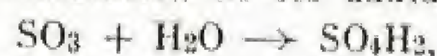
4° Los cuerpos susceptibles de fijar uno de los iones del agua originan la descomposición total de ésta en iones H^+ y OH^-, llamada *hidrólisis*. Tal es el caso de los nitruros y de los carburos metálicos, de los cloruros de ácido, de los ésteres; recordemos, por ejemplo, la preparación del acetileno a partir del carburo cálcico:



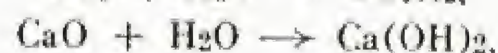
$$C_2Ca + 2HOH \longrightarrow C_2H_2 + Ca(OH)_2.$$

5° Numerosos cuerpos, simples o compuestos, fijan el agua para dar combinaciones.

En ciertas reacciones, hay que establecer la diferencia entre el *agua de constitución*, que forma parte integrante de la molécula del compuesto y que existe, por ejemplo, en los oxácidos y los hidróxidos metálicos obtenidos por hidratación de los anhidridos y de los óxidos:



$$SO_3 + H_2O \longrightarrow SO_4H_2,$$



$$CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2,$$

y el *agua de cristalización*, que se fija solamente en los cuerpos para dar *hidratos* cristalizados; indiquemos, por ejemplo, el hidrato de cloro, Cl_2, $6H_2O$; los del ácido clorhídrico, ClH, $2H_2O$ y ClH, $3H_2O$; los hidratos salinos tales como el tiosulfato cristalizado, $S_2O_3Na_2$, $5H_2O$, o el alumbre, SO_4K_2, $(SO_4)_3Al_2$, $24H_2O$.

6° Citemos, por último, la acción catalizadora del agua. Son numerosísimas las reacciones que requieren la presencia de vestigios de agua para poder tener lugar; así, el cloro no reacciona con el hierro, ni el ácido clorhídrico con el sodio, en atmósfera seca.

Composición del agua. Masa atómica del hidrógeno. — Es muy importante conocer la composición exacta del agua, a fin de poder determinar la masa atómica del hidrógeno, puesto que la del oxígeno ha sido elegida como base.

1° Se efectúa el *análisis*, o descomposición, del agua por electrólisis. Se utiliza para ello un aparato llamado voltámetro, constituido por un recipiente cuyo fondo lo atraviesan dos electrodos de platino (*fig.* 14); sobre cada uno de éstos se coloca una probeta graduada e invertida, llena de una solución acuosa ligeramente acidulada con sulfúrico; el paso de la corriente eléctrica descompone el agua: en la probeta del cátodo, se desprende hidrógeno, y en la del ánodo, oxígeno; se comprueba fácilmente que la cantidad de hidrógeno producida ocupa el doble de volumen que el oxígeno desprendido en la otra probeta.

2° La *síntesis* del agua se realiza con el aparato llamado eudiómetro (*fig.* 15); consiste en un tubo graduado invertido, en el que se introducen el hidrógeno y el oxígeno sobre mercurio; la parte cerrada del tubo está atravesada por dos alambres de platino que quedan uno enfrente del otro, sin tocarse; al establecer la corriente, salta la chispa entre éstos, y la mezcla gaseosa estalla, produciendo agua; si se mantiene la temperatura por encima de 100° C, el agua permanece en estado de vapor, y se comprueba que ocupa un volumen equivalente a los dos tercios de la mezcla primitiva.

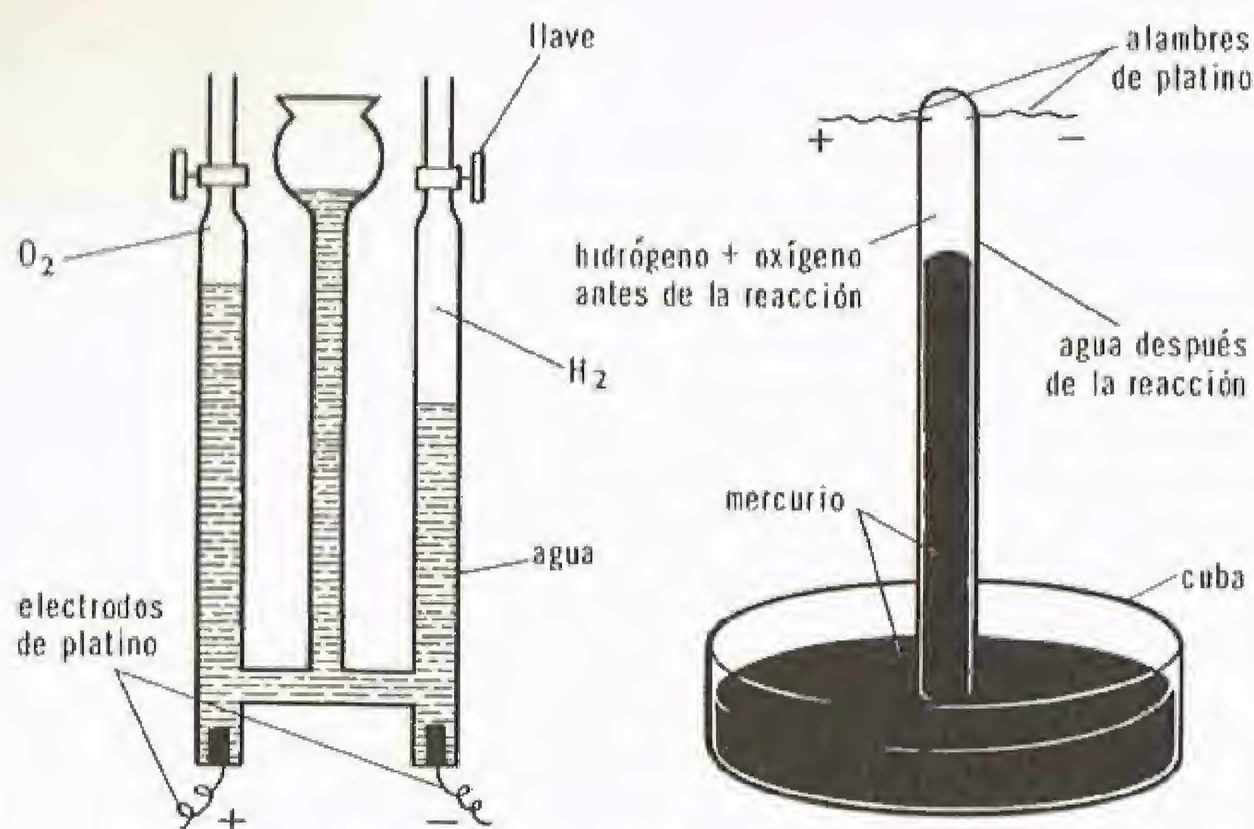
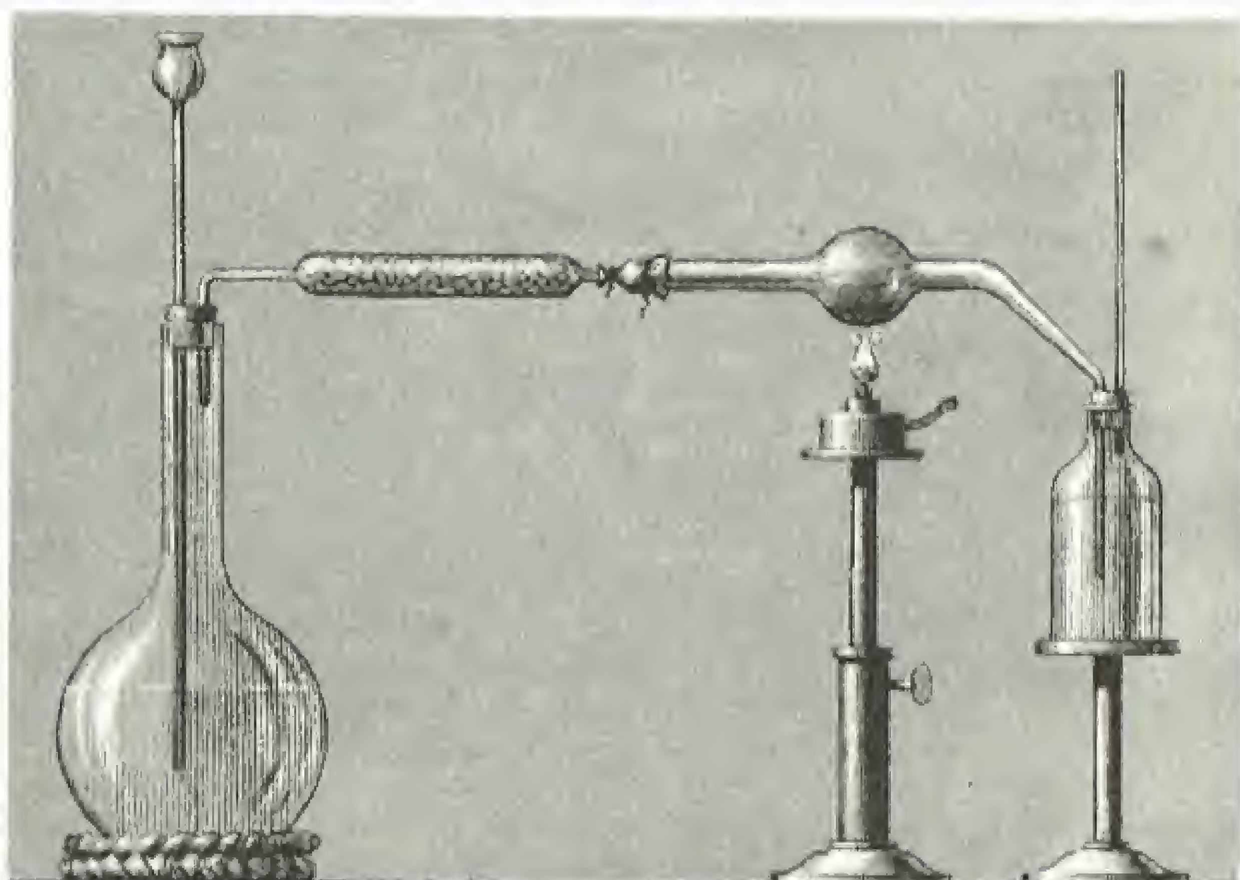


Fig. 14. — Análisis del agua en el voltámetro

Fig. 15. — Síntesis del agua en el eudiómetro



Síntesis del agua por Dumas

De los dos resultados así obtenidos, se deduce que dos volúmenes de hidrógeno combinados con un volumen de oxígeno dan un volumen de agua.

Dumas ha realizado la *síntesis ponderal* del agua haciendo pasar una corriente de hidrógeno sobre óxido de cobre caliente; interpretaba el resultado pesando la cantidad de agua producida y midiendo la disminución de masa del óxido de cobre, debida al oxígeno liberado.

3° Sin entrar en la descripción de diversos procedimientos que presentan sólo un interés histórico, expondremos brevemente el método de Keyser, cuyos resultados son los actualmente admitidos.

Un tubo AB (*fig.* 16) contiene en su parte inferior D anhídrido fosfórico P_2O_5, deshidratante enérgico; se levanta la tapa E y se introduce un segundo tubo T que contiene esponja de paladio y que está perforado en la parte inferior. El paladio posee la doble propiedad de adsorber el hidrógeno y de catalizar la reacción de síntesis del agua. Se introduce en el aparato el hidrógeno, y luego el oxígeno; el agua que se forma es absorbida por el anhídrido fosfórico. Tras haber hecho el vacío en el tubo, se efectúan diferentes pesadas para determinar por separado el peso del hidrógeno, el del oxígeno correspondiente y el del agua formada; por este método, se comprueba que la masa de agua obtenida es igual a la masa de hidrógeno y de oxígeno utilizados.

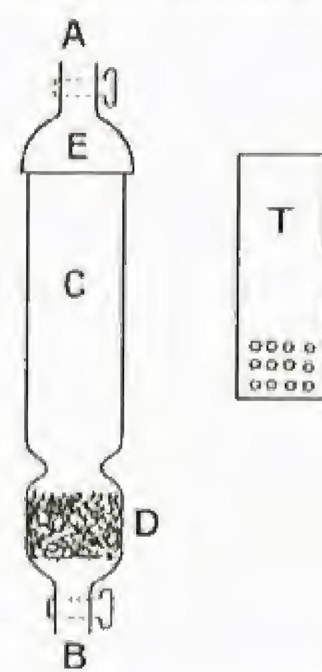


Fig. 16. — Síntesis ponderal del agua por el paladio

Reconocimiento. — 1° Al evaporar el agua sobre una placa de platino, no deja residuo alguno.

2° Se reconoce su presencia, incluso cuando se trata de vestigios, por el sulfato de cobre anhidro, blanco, que se colorea de azul por transformarse en sulfato hidratado, SO_4Cu, $5H_2O$.

Aguas naturales

Las aguas naturales difieren del agua pura por el hecho de que contienen diversas materias en solución y en suspensión.

Las *aguas de lluvia* contienen por toda impureza algunos gases disueltos (y en ciertos casos algo de polvo de la atmósfera); las *aguas de los manantiales* y de los *pozos*, que han atravesado el suelo, contienen substancias minerales y orgánicas además de gases.

Substancias contenidas en el agua. — 1° Se recogen los gases disueltos en el agua provocando la ebullición de ésta (*fig.* 17).

Se reconoce que estos gases contienen nitrógeno y oxígeno, en una proporción aproximada de dos volúmenes de nitrógeno por uno de oxígeno; el resto está constituido por *anhídrido carbónico*, que se encuentra en pequeña proporción cuando se trata del agua de lluvia, y en mayor cantidad en las aguas de infiltración (en este caso procede de la descomposición del carbonato ácido de calcio [v. pág. 282]).

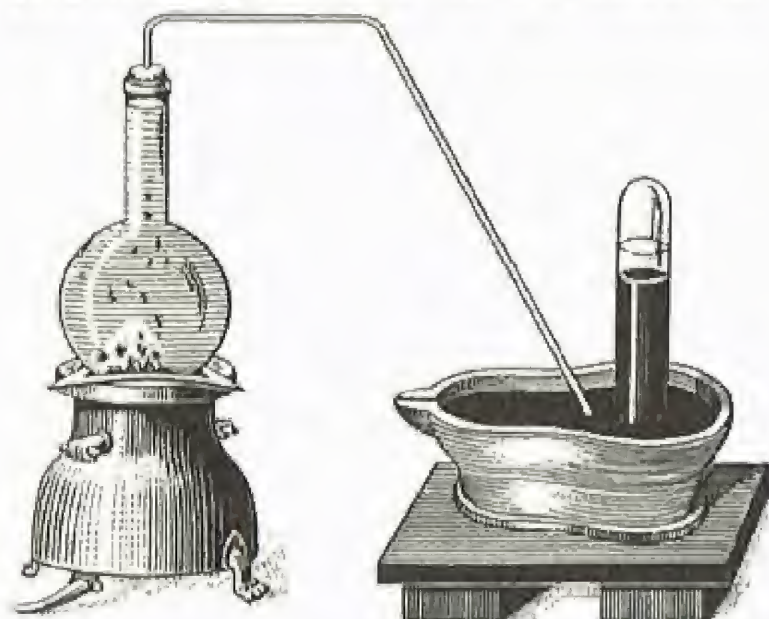


Fig. 17. — **Investigación de los gases disueltos en el agua**

2° Se obtienen las sales disueltas en el agua evaporando ésta; se recoge en el fondo de la cápsula un residuo blanco. La composición de este residuo depende de la naturaleza de los terrenos que el agua ha atravesado. Se reconocen principalmente:

Los *cloruros*, por el precipitado blanco coaguloso de ClAg que dan con el NO_3Ag;

Los *sulfatos*, porque dan un precipitado abundante, blanco, de SO_4Ba, con el Cl_2Ba;

Las *sales de calcio*, porque dan un precipitado blanco de oxalato cálcico, $(COO)_2Ca$, con el oxalato amónico;

El *anhídrido carbónico*, CO_2, porque da un precipitado blanco de CO_3Ca con el agua de cal.

Se reconocen igualmente otras *sales inorgánicas, nitratos, nitritos, sales de magnesio*, etc.

3° El agua contiene también *materias orgánicas* procedentes de la capa de tierra vegetal; como estas substancias son reductoras, se las reconoce y se las determina cuantitativamente por su acción sobre determinados oxidantes, permanganato potásico o cloruro de oro.

4° En fin, el agua natural contiene numerosos *microbios*, cuya presencia se descubre por el microscopio.

Aplicaciones. — Las aplicaciones del agua son innumerables. Sirve con profusión en la vida doméstica, en la agricultura y en la industria.

Agua potable. — Un agua potable debe ser fresca, límpida, incolora e inodora; debe contener gases disueltos y una cantidad pequeña de sales que le comuniquen un ligero sabor (una cantidad excesiva de sales de calcio la hace impropia para la cocción de las legumbres y no da espuma con el jabón). En fin, hay que esterilizarla, es decir, destruir los microbios que contiene.

Se puede esterilizar el agua comenzando por una filtración, que retiene la mayor parte de los microbios; los que subsisten son destruidos mediante un procedimiento químico (cloro, ozono), o por los rayos ultravioleta.

Las aguas *duras*, que contienen una cantidad excesiva de sales de calcio o de magnesio, se tratan por filtración a través de unos cuerpos llamados *ceolitas*. Las ceolitas pueden ser naturales (bentonita) o artificiales (permutita), y transforman las sales cálcicas o magnésicas en sales sódicas.

Agua pesada (D_2O)

Descubierta en 1932 por **Urey**, el agua pesada es un compuesto análogo al agua, en el que el hidrógeno (H = 1) es reemplazado por su isótopo pesado, el deuterio. Existe en proporción muy pequeña en el agua ordinaria ($\frac{1}{5\,000}$).

Es un líquido incoloro análogo al agua, de densidad 1,105, de donde se deriva su nombre, que se solidifica a 3,8° C y hierve a 101,4° C; su densidad máxima corresponde aproximadamente a la temperatura de 12° C. Tiene un índice de refracción menor que el del agua, lo que permite dosificarla en las mezclas.

Por acción del sodio en frío, o del hierro al rojo, el agua pesada da deuterio. A partir del agua pesada se puede preparar igualmente una serie de compuestos del deuterio, análogos a los cuerpos hidrogenados, tales como ClD, C_2D_2...

El agua pesada se electroliza más lentamente que el agua y por consiguiente se acumula en los residuos de la electrólisis de la sosa. Se la llega a separar por este método, practicando a continuación varias destilaciones para obtenerla pura.

Es empleada sobre todo en las pilas de uranio, como moderador de los neutrones, y en las operaciones de química nuclear, en donde se utilizan los núcleos de deuterio como proyectiles.

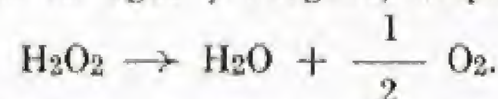
Peróxido de hidrógeno (H_2O_2.) Agua oxigenada

Reseña histórica. — El peróxido de hidrógeno fue descubierto en 1818 por **Thenard**, y estudiado posteriormente por **Schoenbein** y **Berthelot**.

Propiedades físicas. — El peróxido de hidrógeno puro es un líquido incoloro, muy viscoso, de sabor metálico y de densidad 1,46. Presenta reacción débilmente ácida, y al enfriarlo se solidifica en forma de agujas. Es soluble en el agua en todas las proporciones; las soluciones así obtenidas se llaman *agua oxigenada*.

Se expende en el comercio la solución a 2 ó 3%, llamada de 10 ó 12 volúmenes (al descomponerse desprende de 10 a 12 veces su volumen de oxígeno), así como otras soluciones más concentradas (de 110 a 200 volúmenes), muy cáusticas, llamadas *perhidrol*.

Propiedades químicas. — Por diversas influencias, el agua oxigenada se descompone en agua y oxígeno, desprendiendo calor:



$$H_2O_2 \rightarrow H_2O + \frac{1}{2} O_2.$$

1° Los cuerpos pulverulentos (carbón en polvo, bióxido de manganeso) destruyen el agua oxigenada; por este procedimiento, se puede determinar directamente el volumen de oxígeno desprendido en la reacción.

2° El agua oxigenada se descompone al ponerse en contacto con ciertos cuerpos oxidantes, que a su vez se descomponen; el oxígeno desprendido en estos casos procede en parte del agua oxigenada y en parte del cuerpo oxidante. Así, cinco moléculas de peróxido de hidrógeno se destruyen por dos moléculas de permanganato potásico acidulado:



$$2MnO_4K + 3SO_4H_2 + 5H_2O_2 \rightarrow 2SO_4Mn + SO_4K_2 + 8H_2O + 5O_2.$$

Esta reacción sirve para la determinación cuantitativa del peróxido de hidrógeno.

3° Pero, sobre todo, el agua oxigenada es un oxidante enérgico, capaz de transformar el ácido sulfuroso en ácido sulfúrico, las sales ferrosas en férricas, el yoduro potásico en yodo y, prosiguiendo la oxidación, en yodato, el sulfuro de plomo SPb en sulfato SO_4Pb; esta última acción explica el empleo del agua oxigenada en la restauración de cuadros antiguos, cuyos pigmentos a base de plomo se han ennegrecido por efecto del sulfuro de hidrógeno.

Este carácter oxidante determina las propiedades decolorantes del agua oxigenada, que se utiliza para blanquear la lana, la seda, las plumas, el marfil y el pelo, prefiriéndola al cloro por ser menos corrosiva.

Se aplica también el agua oxigenada como antiséptico en medicina, y como agente oxidante en el laboratorio.

Preparación. — 1° Se descompone un peróxido por un ácido. En este procedimiento, que permitió a Thenard descubrir el agua oxigenada, se vierte una suspensión de bióxido de bario en ácido clorhídrico diluido:



$$BaO_2 + 2ClH \rightarrow Cl_2Ba + H_2O_2.$$

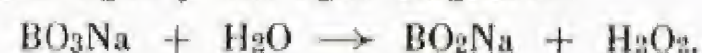
En la industria, se utiliza preferentemente un ácido cuya sal de bario sea insoluble (FH, PO_4H_3, CO_2 a presión).

Para las operaciones de blanqueo, se puede provocar la reacción del ácido sulfúrico sobre el peróxido de sodio:



$$Na_2O_2 + SO_4H_2 \rightarrow SO_4Na_2 + H_2O_2.$$

2° Las persales (sales de anhídridos peroxigenados), tales como el persulfato SO_4K o el perborato BO_3Na, se descomponen al ponerse en contacto con el agua y dan agua oxigenada:



$$BO_3Na + H_2O \rightarrow BO_2Na + H_2O_2.$$

Estas persales se obtienen por electrólisis o por reacción de los anhídridos de ácidos sobre los bióxidos metálicos.

Para el blanqueo de la ropa blanca, se venden en el comercio productos constituidos por una mezcla de jabón y de persal.

3° Las soluciones diluidas se pueden concentrar por destilación a presión reducida.

Reconocimiento. — Descompone el IK, y el yodo puesto en libertad tiñe de azul el engrudo de almidón. En presencia de dicromato potásico y ácido sulfúrico, colorea de azul el éter. Para la determinación cuantitativa, sirve la reacción ya citada anteriormente (V. PROPIEDADES QUÍMICAS).

Azufre (S = 32,066)

Reseña histórica. — El azufre (del latín *sulphur*) se conoce desde las épocas más remotas. Era considerado por los alquimistas como el principio de la combustibilidad. **Lavoisier** ha demostrado que se trata de un cuerpo simple.

Propiedades físicas. — El azufre es un sólido de color amarillo pálido, que se presenta tanto en estado amorfo como cristalizado. Conduce mal el calor y la electricidad y tiene un olor característico. Es insoluble en el agua, y soluble en los disolventes orgánicos, especialmente en el sulfuro de carbono. Su densidad es aproximadamente 2.

Funde hacia 119° C, dando un líquido azul claro que, al seguir calentándolos se obscurece, y pasa a ser viscoso, hasta el punto de que se puede invertir el recipiente sin que por ello se derrame el azufre; si se sigue elevando la temperatura, el azufre vuelve de nuevo a ser fluido, pero conserva el color obscuro; finalmente, hierve a 445° C.

Los vapores de azufre son rojizos; su densidad disminuye a medida que aumenta la temperatura: a 500° C la molécula es S_6, mientras que a partir de 800° C, es S_2.

Se puede provocar la cristalización del azufre:

1° Por evaporación de su solución en el sulfuro de carbono; en estas condiciones, se obtienen cristales *octaédricos* (azufre α), estables hasta 95° C;

2° Por enfriamiento del azufre fundido; en este caso, da unas agujas finas *prismáticas* (azufre β); esta segunda variedad alotrópica es estable solamente por encima de 95° C; en frío, se transforma en la primera variedad.

Existe también en estado amorfo; así, destilando el azufre cristalizado y condensando los vapores en un matraz grande, se forman las flores de azufre, constituidas en gran parte por *azufre amorfo;* se obtiene igualmente azufre amorfo al acidular una solución acuosa de sulfuro amónico.

Si se vierte azufre fundido en agua fría, se forma el llamado *azufre plástico*, sólido obscuro elástico, que se transforma progresivamente en azufre octaédrico.

Propiedades químicas. — El azufre se asemeja al oxígeno por su acción sobre el hidrógeno y los metales; pero su compuesto hidrogenado, SH_2, es mucho menos estable que el agua; además, se combina con el oxígeno.

1° A 450° C, el vapor de azufre se combina con el hidrógeno y da, por una reacción limitada, sulfuro de hidrógeno, SH_2.

Todos los metales, excepto el oro y el platino, arden en una atmósfera de vapor de azufre; calentando unas limaduras de hierro con flor de azufre, se obtiene el sulfuro artificial SFe.

El vapor de azufre se combina con el carbono al rojo; esta reacción sirve para preparar el sulfuro de carbono SC_2.

2° Todos los halógenos atacan el azufre; con el cloro se obtiene S_2Cl_2, líquido amarillo.

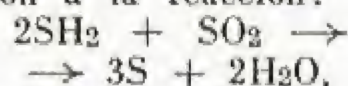
El azufre arde en el aire o en el oxígeno con desprendimiento de calor, dando sobre todo anhídrido sulfuroso, SO_2.

Esta reacción permite explicar las propiedades reductoras del azufre: reduce en caliente el ácido sulfúrico, el ácido nítrico y sus sales, los cloratos; la pólvora negra es una mezcla de nitrato potásico, NO_3K, azufre y carbón en polvo.

Reacciona al rojo con el vapor de agua, dando anhídrido sulfuroso y sulfuro de hidrógeno. Por contacto con los álcalis hirviendo, se obtiene un sulfuro y un tiosulfato (v. p. 269).

Es tóxico, especialmente para los organismos inferiores.

Estado natural. — Se encuentra en estado libre en las regiones volcánicas (Sicilia, Luisiana, Tejas), en donde se atribuye su formación a la reacción:



$$2SH_2 + SO_2 \longrightarrow 3S + 2H_2O,$$

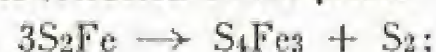
en la que el SH_2 y el SO_2 proceden de la descomposición de los sulfatos.



Explotación del azufre (Agrícola)

Existe también combinado en forma de sulfuros o de sulfuro de hidrógeno (Lacq). De los sulfuros, los más importantes son la pirita, S_2Fe, la calcopirita, S_2FeCu, la galena, SPb, y la blenda, SZn. Los yacimientos más importantes del mundo se encuentran en Río Tinto (España). Se presenta también en forma de sulfatos, principalmente SO_4Ca, $2H_2O$.

Obtención. — 1° Por tostación de las piritas:



$$3S_2Fe \longrightarrow S_4Fe_3 + S_2;$$

se lleva a cabo esta operación en recipiente cerrado.

2° *Extracción siciliana.* Se separa el azufre de su ganga terrosa por fusión. En Sicilia, en donde el mineral es rico y el combustible escaso, se hacen unos montículos con aquél y luego se inflaman *(calcaroni);* parte del azufre se quema, y el calor suministrado por esta combustión origina la fusión del resto de la masa, que fluye en estado líquido. Al quemarse, el azufre da anhídrido sulfuroso, que destruye los cultivos de las zonas inmediatas, por lo que este modo de explotación está autorizado solamente en invierno.

Se mejora el rendimiento de este procedimiento, evitándose al mismo tiempo el inconveniente citado practicando la fusión en hornos de mampostería.

3° *Extracción americana.* En Luisiana, se utiliza vapor de agua sobrecalentada que se envía a presión por unos tubos que bajan a través de la capa del mineral; una vez que el azufre ha fundido por efecto del calor, se inyecta aire a presión y el azufre es impulsado hasta la superficie por otro tubo concéntrico de diámetro menor. Se le recoge en unos depósitos, en donde se solidifica lentamente.

4° Actualmente, se obtienen grandes cantidades de azufre por recuperación de productos secundarios de varias industrias. Así, la desulfuración de los gases naturales puestos en libertad en las explotaciones del petróleo retira el SH_2 de los mismos; a continuación, se quema éste en una atmósfera pobre en oxígeno:



$$2SH_2 + O_2 \longrightarrow 2S + 2H_2O.$$

Por este método, Francia ha adquirido un rango de primer orden entre los principales países productores de azufre.

El azufre bruto obtenido por todos estos métodos se purifica por destilación.

Aplicaciones. — Se le utiliza para tratar el oídium, enfermedad de la vid. Se le incorpora en una proporción de 5% al caucho para vulcanizarlo, y en una proporción de 30% para obtener la ebonita. Se le emplea igualmente en la fabricación de cerillas, de la pólvora negra y de diversos productos farmacéuticos. En química, sirve para preparar el anhídrido sulfuroso, el sulfuro de carbono, los tiosulfatos, etc.

Compuestos oxigenados del azufre

VALENCIA	ÓXIDOS	ÁCIDOS
II	SO (monóxido de azufre)	SO_2H_2 (ác. sulfoxílico)
		$S_2O_3H_2$ (ác. sulfoxílico)
III		$S_2O_4H_2$ (ác. hiposulfuroso, o ác. hidrosulfuroso)
IV	SO_2 (anhídrido sulfuroso)	SO_3H_2 (ác. sulfuroso)
		$S_2O_5H_2$ (ác. pirosulfuroso)
V		$S_2O_6H_2$ (ác. hiposulfúrico)
VI	SO_3 (anhídrido sulfúrico)	SO_4H_2 (ác. sulfúrico)
		$S_2O_7H_2$ (ác. pirosulfúrico)
	S_2O_7 (anhíd. persulfúrico)	SO_5H_2 (ác. monopersulfúrico, o ác. de Caro)
		$S_2O_8H_2$ (ác. peroxidisulfúrico, o ác. persulfúrico)
ÁCIDOS POLITIÓNICOS		$S_3O_6H_2$ (ác. tritiónico)
		$S_4O_6H_2$ (ác. tetratiónico)
		$S_5O_6H_2$ (ác. pentatiónico)
		$S_6O_6H_2$ (ác. exatiónico)

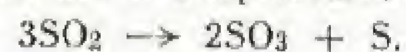
Como se ve por la presente tabla, el azufre forma combinaciones oxigenadas a diversos grados de valencia. De todos los ácidos, se conocen en forma pura el sulfúrico, el monopersulfúrico y el peroxidisulfúrico; la composición de todos los demás se deduce de la de sus sales.

Vamos a estudiar a continuación los compuestos más importantes.

Anhídrido sulfuroso, ácido sulfuroso y sulfitos

Propiedades físicas. — El anhídrido sulfuroso es un gas incoloro, de olor picante, que se puede licuar por simple compresión a tres atmósferas, dando un líquido incoloro que no conduce la corriente eléctrica; por ulterior enfriamiento, forma cristales de color blanco. En estado gaseoso, se disuelve muy bien en el agua (70 volúmenes en las condiciones normales); en estado líquido, disuelve ciertas sales inorgánicas, siendo entonces la solución conductora de la electricidad.

Propiedades químicas. — 1° El anhídrido sulfuroso es un cuerpo *estable;* se disocia solamente a temperaturas elevadas:



$$3SO_2 \longrightarrow 2SO_3 + S.$$

2° Los cuerpos muy ávidos de oxígeno lo *reducen;* así, con el hidrógeno en caliente se verifica la reacción:



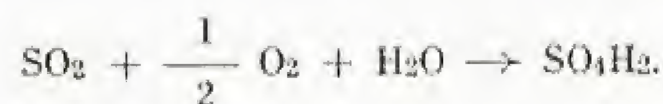
$$SO_2 + 2H_2 \longrightarrow 2H_2O + S.$$

El hidrógeno naciente (v. p. 539) lo transforma en sulfuro de hidrógeno.

3º Puesto que el azufre puede tener la valencia VI, se conduce como un *radical bivalente*, y puede fijar dos átomos de cloro dando el cloruro de sulfurilo, SO_2Cl_2 (cloruro del ácido sulfúrico), líquido incoloro, fumante y de olor picante.

Por contacto con la esponja de platino, el oxígeno lo transforma en anhídrido sulfúrico. La industria utiliza esta reacción en el procedimiento de contacto (v. p. 270) para la preparación del ácido sulfúrico.

La solución se oxida al contacto del aire y da lentamente ácido sulfúrico:



$$SO_2 + \frac{1}{2} O_2 + H_2O \rightarrow SO_4H_2.$$

Estas últimas propiedades explican el carácter *reductor*, importantísimo, del anhídrido y sobre todo de su solución.

Ésta reduce el ácido nítrico al estado de vapores nitrosos, el ácido yódico (y los yodatos) al estado de yodo y ulteriormente de ácido yodhídrico, el permanganato y el bicromato potásico, las sales férricas, etc.

Los bióxidos metálicos, tales como PbO_2, BaO_2, MnO_2, absorben el anhídrido sulfuroso con producción de sulfatos.

5º A causa de su poder reductor, el anhídrido sulfuroso posee un poder decolorante considerable; se le utiliza para quitar las manchas de frutas o de vino en la ropa blanca.

En fin, su solución acuosa posee las propiedades de los *ácidos débiles*. Se admite que contiene ácido sulfuroso, SO_3H_2, aunque hasta la fecha no se le haya podido aislar.

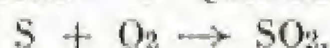
Da lugar a dos clases de sales: los *sulfitos ácidos*, de los que el más importante es la sal de sodio, SO_3HNa, llamada corrientemente bisulfito, que reemplaza frecuentemente el anhídrido sulfuroso gracias a sus propiedades reductoras y decolorantes, y los *sulfitos neutros*, como el sulfito sódico, SO_3Na_2.

El sulfito ácido se transforma, por desecación, en pirosulfito, $S_2O_5Na_2$.

Composición. — Se ha hallado su composición por síntesis, quemando azufre en una atmósfera de oxígeno, transformación que tiene lugar a volumen constante. De su composición, se puede deducir la masa atómica del azufre.

Estado natural. — El anhídrido sulfuroso es el principal constituyente de las fumaroles de los volcanes. Existe en los gases producidos por la combustión de la hulla, que contiene siempre un poco de azufre; por esta razón, se le encuentra en la atmósfera de las grandes ciudades.

Preparación industrial. — 1º Quemando azufre:

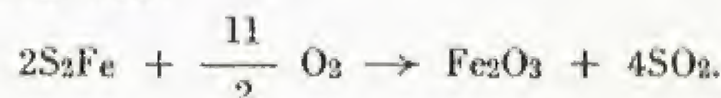


$$S + O_2 \rightarrow SO_2,$$

se obtiene anhídrido sulfuroso, exento de arsénico, aunque el precio de costo resulta elevado.

La combustión tiene lugar en hornos especiales, constituidos por una cámara de caldeo del aire, una cuba de azufre y una cámara de combustión. El aire caliente se dirige a la superficie del azufre en fusión; de esta manera, la utilización del oxígeno es completa, y por los tubos de evacuación sale una mezcla de anhídrido sulfuroso y nitrógeno.

2º Se *tuesta* un sulfuro metálico, generalmente la pirita de hierro, S_2Fe, o la blenda, SZn:



$$2S_2Fe + \frac{11}{2} O_2 \rightarrow Fe_2O_3 + 4SO_2.$$

La reacción es suficientemente exotérmica para, una vez provocada la combustión en un punto, extenderse a toda la masa; se envía aire sobre la pirita desparramada en los pisos de un horno metálico (*figura* 18).

Este horno está formado por una parte fija, especie de cilindro vertical revestido interiormente con ladrillos refractarios, en la que existen siete u ocho s o l e r a s circulares, de tierra refractaria, barridas por una serie de rastrillos montados en un árbol vertical hueco, animado de movimiento rotatorio, situado en el centro del sistema.

La pirita es distribuida por una tolva hasta la s o l e r a superior y arrastrada al centro, de donde cae al piso inferior.

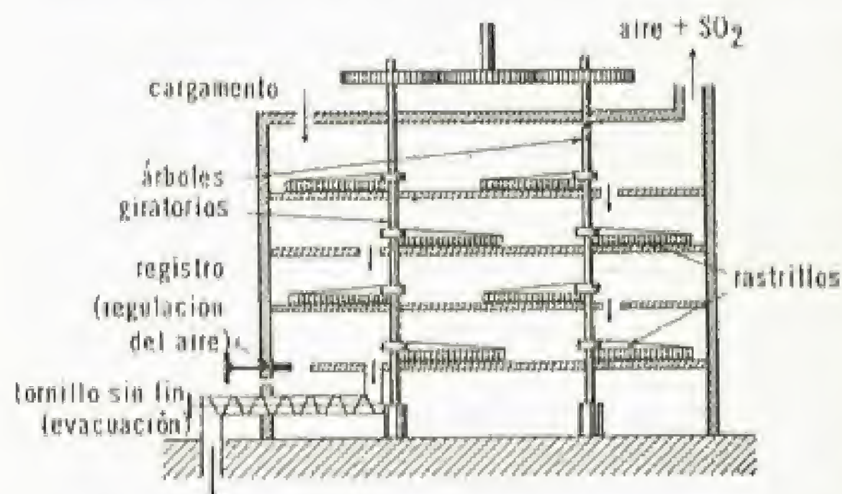


Fig. 18. — Horno metálico tipo Harris para la producción de anhídrido sulfuroso

Aquí, se esparce del centro a la periferia, y pasa luego a alimentar la solera siguiente. La combustión es regular, el encendido comienza en la solera superior, y la admisión del aire que sube en el horno se ajusta mediante un registro.

El árbol central y los brazos se refrigeran por una corriente de aire o de agua.

Cuando se trata de unidades muy importantes (50 toneladas y más), se instalan hornos rotatorios análogos a los empleados en la industria del cemento; los gases que salen del horno se dirigen a una cámara de polvos, en la que quedan retenidos éstos, y pasan después a la torre de Glover (v. p. 270).

El anhídrido sulfuroso se licúa por compresión y se vende en sifones de vidrio.

Preparación en el laboratorio. — Cuando se requieren cantidades pequeñas de este gas, se reduce el ácido sulfúrico en caliente con carbón o cobre, de acuerdo con las reacciones:



$$2SO_4H_2 + C \rightarrow CO_2 + 2SO_2 + 2H_2O,$$
$$2SO_4H_2 + Cu \rightarrow SO_2 + SO_4Cu + 2H_2O.$$

Se puede tratar también el sulfito ácido de sodio, SO_3HNa, por el ácido sulfúrico.

Aplicaciones. — La mayor parte del anhídrido sulfuroso preparado sirve para la fabricación de ácido sulfúrico; en menor escala, se le utiliza también para la fabricación de sulfitos y de tiosulfatos.

Se le emplea en el blanqueo de la lana, en la extinción de incendios de chimenea, en la producción de frío y la preparación de hielo, en las azucareras, en enología, en la industria de los extractos curtientes, etc.

Sulfitos

El ácido sulfuroso es bibásico (o dibásico) y, por lo tanto, da lugar a dos tipos de sales: los *sulfitos neutros*, en los que los dos H se hallan substituidos por un metal, y los *sulfitos ácidos*, o bisulfitos, en los que solamente está substituido un H.

Propiedades. — Los sulfitos neutros alcalinos se disuelven bien en el agua; la solución presenta carácter básico a causa de la hidrólisis que tiene lugar. Los demás sulfitos son menos solubles y presentan reacción neutra.

Preparación. — 1º Los sulfitos solubles se pueden obtener haciendo pasar una corriente de anhídrido sulfuroso por las soluciones correspondientes de carbonatos:



$$SO_2 + CO_3Na_2 \rightarrow SO_3Na_2 + CO_2.$$

2º Los sulfitos insolubles, por precipitación:



$$SO_3Na_2 + Cl_2Zn \rightarrow SO_3Zn + 2ClNa.$$

Reconocimiento. — Los sulfitos dan con el cloruro de bario un precipitado blanco de sulfito de bario, que se disuelve en el ácido nítrico diluido:



$$SO_3Na_2 + Cl_2Ba \rightarrow SO_3Ba + 2ClK.$$

Anhídrido sulfúrico (SO_3)

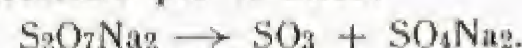
Propiedades. — 1º Se presenta corrientemente en estado sólido o líquido (P. de F. 17º C); en estado sólido cristaliza en agujas muy finas; en estado líquido, hierve fácilmente.

2º Por el calor, se disocia en anhídrido sulfuroso y oxígeno.

3º Presenta una gran avidez por el agua, con la que se combina dando ácido sulfúrico, desprendiendo gran cantidad de calor.

Preparación. — Desde el punto de vista industrial, se le prepara exclusivamente para su ulterior transformación en oleum (véase más adelante).

En el laboratorio, se utiliza la destilación del oleum que, al principio, deja en libertad anhídrido sulfúrico puro. Se puede igualmente descomponer un pirosulfato por el calor:



$$S_2O_7Na_2 \rightarrow SO_3 + SO_4Na_2.$$

Aplicaciones. — Además de su empleo, el principal, para la obtención del ácido sulfúrico, se le utiliza en los laboratorios como deshidratante.

Ácido sulfúrico (SO_4H_2)

Reseña histórica. — Los alquimistas empleaban el ácido sulfúrico, al que llamaban *aceite de vitriolo*; lo preparaban destilando sulfato de hierro con arcilla. En 1620, **Lemery** reconoció que se obtenían cantidades notables de vitriolo en la combustión, al aire húmedo, de azufre al que se añadía previamente un poco de salitre, procedimiento que se empleó en las fábricas de poca importancia. Las primeras cámaras de plomo fueron instaladas en 1726 en Inglaterra, y en 1746 en Francia. Los principales perfeccionamientos de esta industria tuvieron lugar en 1774 (*La Follie*, chorro de vapor de agua en las cámaras), 1793 (fabricación continua por **Clement** y **Desormes**), 1827 (**Gay-Lussac** introdujo la torre de absorción del dióxido de nitrógeno), 1837 (**Michel Perret** reemplazó el azufre por las piritas) y 1861 (torre de *Glover*). En fin, en 1895, comenzó a utilizarse industrialmente el método de contacto.

Propiedades físicas. — El ácido sulfúrico se encuentra en el comercio en varias formas:

1º *Ácido sulfúrico de 66º Baumé*, mezcla aceotrópica, procedente de la destilación del ácido diluido; contiene 98% de ácido SO_4H_2; es un líquido incoloro, viscoso, de densidad 1,85, que hierve a 320º C;

2º *Ácido sulfúrico puro*, SO_4H_2, obtenido por adición de anhídrido sulfúrico al precedente; es un sólido incoloro cristalizado, que funde a 10º C; comienza a hervir a 290º C, pero se descompone y regenera el ácido precedente;

3º *Ácidos fumantes* (*oleums* u *óleos*), que contienen más anhídrido sulfúrico que el precedente; son líquidos espesos, de color pardo a causa de la materia orgánica carbonizada que encierran.

En estas soluciones, se depositan a veces cristales de *ácido pirosulfúrico*, $S_2O_7H_2$.

Estos ácidos se disuelven en todas proporciones en el agua con desprendimiento de calor considerable; para evitar las proyecciones, sumamente peligrosas, se vierte gota a gota, o en un chorro muy fino, el ácido en el agua, diluyendo constantemente, y nunca el agua en el ácido; por enfriamiento, estas soluciones pueden dar lugar a varios hidratos cristalizados.

Propiedades químicas. — 1.º El ácido sulfúrico comienza a disociarse a su temperatura de ebullición:



$$SO_4H_2 \Longleftrightarrow SO_3 + H_2O;$$

a temperatura más elevada, el anhídrido sulfúrico se disocia a su vez, dando anhídrido sulfuroso y oxígeno.

Por esta acción, el ácido sulfúrico puede actuar como *oxidante*. Es reducido en caliente por el hidrógeno, el azufre, el fósforo, el carbono, numerosos metales, diversos compuestos hidrogenados poco estables (IH, SH_2...).

2º Es un *ácido fuerte* que posee dos funciones "ácido", y da con los álcalis dos series de sales, los sulfatos ácidos (SO_4HNa) y los sulfatos neutros (SO_4Na_2).

Desplaza de sus sales la mayor parte de los demás ácidos, más volátiles que él; de esta manera, se pueden preparar los ácidos clorhídrico, nítrico, fosfórico, acético, etc.

Ataca todos los metales, excepto el oro y el platino; diluido y en frío, reacciona con los más oxidables, desprendiendo hidrógeno:



$$SO_4H_2 + Zn \longrightarrow SO_4Zn + H_2.$$

Con el cobre, plomo, plata y mercurio, reacciona en caliente; en este caso, se reduce al estado de anhídrido sulfuroso:



$$2SO_4H_2 + Cu \longrightarrow SO_4Cu + SO_2 + 2H_2O.$$

3º Es un deshidratante enérgico, utilizado para extraer los vestigios de humedad de los gases, que carboniza los hidratos de carbono, tales como el azúcar, y que corroe la piel; se saca provecho de su acción sobre la celulosa en la preparación del papel sulfurizado.

4º El ácido fumante da, con el benceno y sus derivados, reacciones de sulfonación:



$$C_6H_6 + SO_4H_2 \longrightarrow C_6H_5SO_3H + H_2O.$$

Se utilizan estas reacciones en la síntesis del fenol y en la fabricación de los explosivos, los colorantes y los plásticos.

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — En general, los sulfatos son solubles; sin embargo, los sulfatos de plomo y de bario son insolubles. Se reconocen los primeros por el precipitado blanco de sulfato de bario que dan con el cloruro de bario:



$$SO_4Na_2 + Cl_2Ba \longrightarrow SO_4Ba + 2ClNa;$$

esta reacción permite, además, hacer la determinación cuantitativa del ácido y de sus sales.

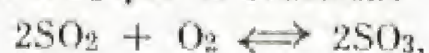
Los sulfatos insolubles se reconocen porque se transforman en sulfuros al ser reducidos sobre el carbón, a temperatura elevada.

Preparación industrial. — 1.º Generalmente, se preparan los *ácidos fumantes* por el procedimiento de contacto.

2º El ácido ordinario se obtiene por el procedimiento de las *cámaras de plomo*.

En ambos casos, la fabricación comprende en primer lugar la preparación del anhídrido sulfuroso (v. p. 268), luego su oxidación, y finalmente su hidratación.

Procedimiento de contacto. — Consiste en fabricar anhídrido sulfúrico, SO_3, a partir de SO_2 por la reacción:



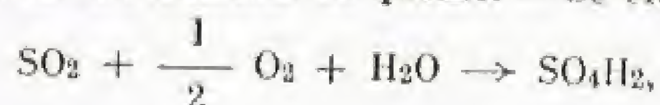
$$2SO_2 + O_2 \Longleftrightarrow 2SO_3,$$

con un rendimiento máximo. Como esta reacción es exotérmica, debe tener lugar a temperatura poco elevada; en estas condiciones, la velocidad de reacción es muy pequeña, por lo que hay que emplear un *catalizador*.

Los gases que salen del horno de piritas se purifican y deshidratan lavándolos con ácido sulfúrico (el anhídrido arsenioso y el agua envenenan el catalizador y paralizan toda su actividad). Generalmente, la catálisis ocurre en dos tiempos: el óxido férrico, Fe_2O_3, comienza la reacción hacia 550° C, y el amianto platinado la prosigue hacia 450° C; el primer catalizador, barato, detiene las últimas impurezas, y el segundo eleva el rendimiento de la reacción hasta más de 95%.

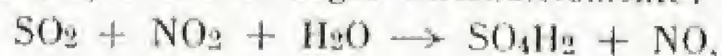
Los vapores de anhídrido sulfúrico producido se recogen en ácido sulfúrico concentrado y dan los ácidos fumantes u *oleums*, mezclas ricas de anhídrido sulfúrico y agua.

Procedimiento de las cámaras de plomo. — Se efectúa la reacción



$$SO_2 + \frac{1}{2} O_2 + H_2O \longrightarrow SO_4H_2,$$

catalizándola por los óxidos del nitrógeno. Existen diversas teorías sobre esta acción catalítica; la más simple es la que supone las reacciones siguientes, que tienen lugar alternativamente:



$$SO_2 + NO_2 + H_2O \longrightarrow SO_4H_2 + NO,$$



$$NO + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow NO_2.$$

Otras ponen en juego un compuesto intermedio, el sulfato ácido de nitrosilo, SO_4HNO, que parece formarse al reaccionar el anhídrido sulfuroso con el ácido nítrico:



$$SO_2 + NO_3H \longrightarrow SO_4HNO,$$

y que, según esta segunda teoría, se descompone por contacto con el vapor de agua:



$$SO_4HNO + H_2O \longrightarrow SO_4H_2 + NO_3H,$$

dando finalmente ácido sulfúrico.

Independientemente del horno de piritas, en el que tiene lugar la formación de la mezcla gaseosa $SO_2 + \frac{1}{2} O_2$, la instalación comprende tres partes: la torre de *Glover*, las *cámaras de plomo* y la torre de *Gay-Lussac*.

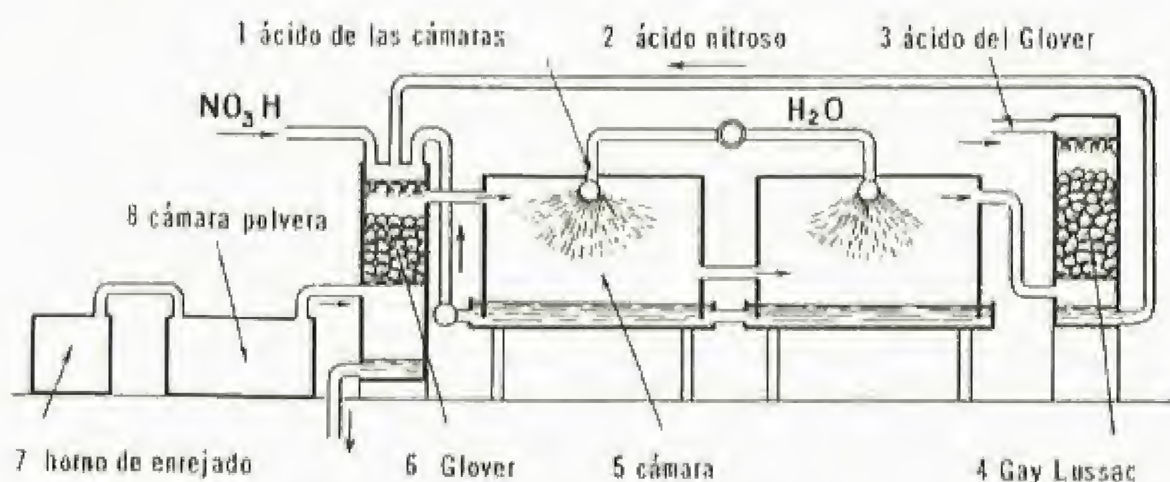


Fig. 19. — Preparación del ácido sulfúrico por el procedimiento de las cámaras de plomo

En la torre de Glover, el anhídrido sulfuroso SO_2 se pone en contacto con el ácido nítrico y el ácido sulfúrico concentrado, que contiene diversos productos nitrosos (procedentes de la torre de Gay-Lussac): de donde, 1º, resulta una primera formación y una concentración de ácido, que se recoge en el fondo a 60º Baumé; 2º, los gases procedentes del horno de tostación de las piritas se enfrían; 3º, los productos nitrosos vuelven al ciclo de las reacciones.

Estos gases pasan después a las cámaras de plomo, vastas campanas de plomo soldadas e invertidas sobre unas cubas igualmente de plomo (de tres a seis). En las cámaras, se inyecta por la parte superior vapor de agua, y el ácido sulfúrico que se forma se deposita en el fondo.

Los gases evacuados contienen solamente nitrógeno, oxígeno y productos nitrosos. Se les envía a la torre de Gay-Lussac, en donde, lavados por ácido sulfúrico concentrado (de la torre de Glover), abandonan los productos nitrosos; el líquido que se recoge en el fondo se envía a la torre de Glover.

Se le añade aquí una cantidad pequeña de ácido nítrico para compensar las pérdidas de óxidos de nitrógeno ocurridas precedentemente.

El ácido sulfúrico que se recoge en el fondo de las cámaras de plomo acusa 52º Baumé, concentración suficiente para la mayor parte de sus aplicaciones industriales; en el fondo de la torre de Glover se obtiene ácido sulfúrico de 60º Baumé (los productos nitrosos siguen la marcha: torre de Glover-cámaras-torre de Gay-Lussac-torre de Glover) [*fig.* 19].

El ácido obtenido por el procedimiento de las cámaras de plomo contiene diversas impurezas (SO_4Pb, As_2O_3, productos nitrosos), por lo que en ciertos casos se le purifica; se le concentra haciéndole atravesar por una atmósfera de gases calientes en torres análogas a la de Glover (torres de *Gaillard*). A continuación, se le puede destilar en alambiques de ferrosilicio, para obtener la mezcla aceotrópica de 66º Baumé.

Aplicaciones. — Los empleos del ácido sulfúrico son muy numerosos y en extremo importantes. Sirve para la preparación de la mayor parte de los ácidos minerales (clorhídrico, nítrico, fosfórico...) y orgánicos (acético, esteárico, tartárico...), de los sulfatos de hierro, cobre y amonio, empleados en la agricultura, de los superfosfatos y de los alumbres. Se le emplea en la fabricación de la glucosa y del alcohol (por sacarificación del almidón), de los derivados sulfonados y de los fenoles, de los derivados nitrados y de las anilinas (explosivos, colorantes, resinas sintéticas, textiles artificiales).

El ácido diluido con agua se emplea en la depuración de los aceites y de los benzoles, en la refinación de los petróleos y en el decapado de los metales. Se le utiliza igualmente en las pilas y en los acumuladores. La producción mundial es aproximadamente de diez millones de toneladas. América se sitúa a la cabeza de los países productores, con cuatro millones, y siguen después Francia y Alemania.

Sulfatos

El ácido sulfúrico es bibásico, de manera que da lugar a dos tipos de sales: los *sulfatos neutros*, en los que los dos H del ácido están substituidos por un metal, y los *sulfatos ácidos*, o bisulfato, en los que solamente está reemplazado por un metal uno de los H.

Se encuentran con gran profusión en la naturaleza (yeso, baritina, alunita...).

Los sulfatos alcalinos y de otros muchos metales se disuelven bien en el agua. Los de los metales alcalinotérreos son todos insolubles, excepto el de magnesio. Las soluciones acuosas de los sulfatos alcalinos son neutras; en cambio, las de los sulfatos de metales pesados y las de los bisulfatos son ácidas.

La insolubilidad de la sal de bario permite la identificación y la determinación cuantitativa del anión sulfato (véase, en la columna anterior, Reconocimiento y determinación cuantitativa).

Peroxiácidos del azufre

Acido monopersulfúrico. — Este ácido, llamado también *ácido de Caro*, se obtiene por reacción, reversible, del ácido sulfúrico con el agua oxigenada:



$$SO_4H_2 + H_2O_2 \Longleftrightarrow SO_5H_2 + H_2O.$$

A la temperatura ordinaria, forma cristales blancos, que funden con el calor; se descompone con facilidad, dando ácido sulfúrico y una mezcla de oxígeno y un poco de ozono. Es muy oxidante.

Acido peroxidisulfúrico. — Se forma por electrólisis del ácido sulfúrico.

Se presenta en forma de cristales blancos, que funden a una temperatura un poco más elevada que la del ácido precedente; se descompone fácilmente, desprendiendo oxígeno. Sus sales, los perodisulfatos, o persulfatos, son más estables. El ácido y sus sales presentan propiedades oxidantes muy enérgicas.

Compuestos con varios átomos de azufre

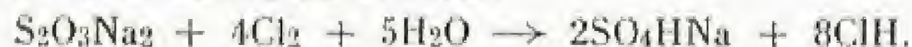
Acido tiosulfúrico. Tiosulfatos. — Hasta la fecha, no se ha podido aislar el ácido tiosulfúrico, cuya fórmula se deduce de la de sus sales, los tiosulfatos. Por reacción con una solución de tiosulfato, un ácido da, al cabo de un período de tiempo mayor o menor, un precipitado de azufre y una solución de anhídrido sulfuroso:



$$S_2O_3H_2 \longrightarrow S + SO_3H_2.$$

Propiedades. — 1º El más importante es el tiosulfato sódico. Se presenta en forma de cristales de gran tamaño, incoloros, de fórmula $S_2O_3Na_2\,5H_2O$, que se deshidratan al calentarlos. Es muy soluble en el agua.

2º Como los sulfitos, los tiosulfatos son reductores; pero son francamente más estables que aquéllos, y sus soluciones no se oxidan por el aire. Los oxidantes enérgicos (agua de cloro, permanganato potásico, etcétera) los transforman en sulfatos:



$$S_2O_3Na_2 + 4Cl_2 + 5H_2O \longrightarrow 2SO_4HNa + 8ClH.$$

El yodo los oxida, pero solamente al estado de tetrationato:



$$2S_2O_3Na_2 + I_2 \longrightarrow S_4O_6Na_2 + 2INa.$$

Esta reacción, muy importante, sirve para la determinación cuantitativa del yodo.

3º Con los cloruros, bromuros y yoduros de plata, los tiosulfatos dan compuestos de adición solubles. Esta propiedad hace que se empleen soluciones de tiosulfato sódico para los baños fijadores en la industria fotográfica.

Preparación. — Se obtiene tiosulfato sódico por reacción del azufre en flor sobre una solución de sulfito o una solución de sosa hirviendo:



$$S + SO_3Na_2 \longrightarrow S_2O_3Na_2,$$



$$12S + 6NaOH \longrightarrow S_2O_3Na_2 + 2S_5Na_2 + 3H_2O.$$

Por enfriamiento, cristaliza el tiosulfato.

Acido hiposulfuroso. Hiposulfitos. — La fórmula del ácido hiposulfuroso, que no existe en libertad, se deduce de sus sales, los hiposulfitos. De éstos, el más importante es el hiposulfato sódico, $S_2O_4Na_2$, empleado en tintorería.

Aclaremos aquí la confusión muy generalizada que consiste en dar la denominación de hiposulfitos a los tiosulfatos, cuando, en realidad, ambas sales son diferentes.

Acido hiposulfúrico. Hiposulfatos. — Al ácido hiposulfúrico se le llama también *ácido ditiónico*, por la analogía que presenta en su fórmula con los ácidos politiónicos. No existe en forma libre, aunque sí en solución acuosa. Sus sales, los hiposulfatos o ditionatos, son estables; se las puede obtener oxidando los tiosulfatos con peróxido de hidrógeno:



$$S_2O_3Na_2 + 3H_2O_2 \longrightarrow S_2O_6Na_2 + 3H_2O.$$

Acidos politiónicos. Politionatos. — Se conocen con el nombre de ácidos politiónicos los ácidos tritiónico, $S_3O_6H_2$, tetratiónico, $S_4O_6H_2$, pentatiónico, $S_5O_6H_2$, y exatiónico, $S_6O_6H_2$, y con el de politionatos sus sales correspondientes.

Se obtiene una mezcla de ácidos politiónicos haciendo pasar una corriente de sulfuro de hidrógeno por anhídrido sulfuroso:



$$5SH_2 + 10SO_2 \longrightarrow 3S_5O_6H_2 + 2H_2O,$$



$$S_5O_6H_2 + 10SO_2 + 4H_2O \longrightarrow 5S_3O_6H_2,$$



$$S_5O_6H_2 + S_3O_6H_2 \longrightarrow 2S_4O_6H_2.$$

Esta mezcla, llamada *líquido de Wackenroder*, ofrece un aspecto turbio a causa del azufre precipitado.

Los ácidos son más estables que sus sales; su estudio ha dado lugar a numerosas hipótesis sobre el grado de valencia del azufre combinado.

Sulfuro de hidrógeno o ácido sulfhídrico (SH_2)

Reseña histórica. — Conocido desde la Antigüedad con el nombre de *aire azufrado maloliente*, fue estudiado por **Berthollet**, que determinó su composición (1795).

Propiedades físicas y fisiológicas. — El sulfuro de hidrógeno es un gas incoloro, de olor fétido, a huevos podridos; se licúa fácilmente y es bastante soluble en el agua. Su solución acuosa, llamada *ácido sulfhídrico*, es ácida al tornasol; sin embargo, se halla muy poco disociada en sus iones, por lo que es un ácido débil.

Es muy tóxico.

Propiedades químicas. — 1º Se descompone fácilmente por el calor en sus elementos, por lo que puede obrar como hidrogenante o como sulfurante.

2º Arde con llama azul, dando vapor de agua y anhídrido sulfuroso; su solución se altera en frío en presencia de aire, produciendo azufre, que precipita. Puesto en contacto con un cuerpo poroso, en caliente, se puede oxidar al estado de ácido sulfúrico, SO_4H_2.

El sulfuro de hidrógeno es reductor: reduce el ácido nítrico y el ácido sulfúrico concentrado.

3º Se descompone por los *halógenos*, lo que explica las propiedades desinfectantes del cloro:



$$SH_2 + Cl_2 \longrightarrow 2ClH + S.$$

4º Da, con las bases, sulfuros neutros, como el SNa_2, y sulfuros ácidos o sulfhidratos, como el $SHNa$; ataca gran número de metales en frío. Reacciona con muchas *sales disueltas* para dar, de acuerdo con las reglas de Berthollet, sulfuros insolubles. El color del precipitado obtenido permite en muchos casos reconocer la naturaleza del metal de la sal disuelta, de donde se deriva su principal aplicación: el análisis de las sales por vía húmeda.

Estado natural. — Este gas existe en las fumarolas de los volcanes, así como en numerosos manantiales sulfurosos. Se desprende siempre que la materia orgánica entra en putrefacción, por descomposición de los albuminoides.

Preparación. — Se le obtiene descomponiendo un sulfuro por un ácido.

1º El sulfuro de hierro artificial (v. p. 268) reacciona con el ácido clorhídrico o sulfúrico diluidos:



$$SFe + SO_4H_2 \longrightarrow SO_4Fe + SH_2.$$

El sulfuro de hidrógeno resultante contiene algo de hidrógeno procedente de la reacción del ácido sobre el hierro no sulfurado.

Esta reacción tiene lugar en frío, y se practica corrientemente en un aparato de Kipp.

2º Se le obtiene puro tratando en caliente el sulfuro de antimonio cristalizado, S_3Sb_2, por el ácido clorhídrico concentrado.

Determinación cuantitativa. — Se le dosifica mediante un licor valorado de yodo.

Selenio (Se = 78,96)

Reseña histórica. — El selenio (de *selênion*, resplandor de la Luna) fue descubierto por **Berzelius** (1817) en el barro de las cámaras de plomo, y llamado así por su analogía con el telurio, ya conocido.

Propiedades. — Existe en varias formas alotrópicas: la variedad roja, monoclínica, y la variedad gris, hexagonal; ésta presenta a su vez dos formas A y B, de las que la primera conduce mal la corriente eléctrica y la segunda es buena conductora; por esta razón, se emplea el selenio en fotoelectricidad. Da lugar a soluciones coloidales de matices variados.

Tratando los seleniuros por un ácido fuerte, se obtiene seleniuro de hidrógeno, SeH_2, gas incoloro, maloliente y combustible, que se asemeja al sulfuro de hidrógeno.

El selenio arde en una atmósfera de oxígeno dando SeO_2, anhídrido selenioso, sólido blanco cristalizado; a partir de éste, se puede obtener, por tratamiento con agua, ácido selenioso SeO_3H_2, mucho más débil que el ácido sulfuroso, y, por oxidación, ácido selénico SeO_4H_2, cuyas sales, los seleniatos, son isomorfas de los sulfatos.

Estado natural. — Se le encuentra principalmente en la zorgita, seleniuro natural de plomo, que abunda en la Argentina.

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — Tratado con SH_2, el selenio forma un precipitado amarillo limón, que se disuelve en ácido sulfúrico, al que tiñe de verde. Para la determinación cuantitativa, se precipita la variedad roja mediante un reductor y se pasa de ésta a la variedad gris.

Telurio (Te = 127,61)

Reseña histórica. — El telurio (de *tellus*, tierra) fue descubierto en 1782 por **Muller** de Reichenstein.

Propiedades. — Es un sólido blanco, de aspecto metálico, insoluble en la mayor parte de los disolventes orgánicos, soluble en el ácido sulfúrico. Se combina con el hidrógeno a temperatura elevada, dando telururo de hidrógeno TeH_2, muy inestable. En una atmósfera de oxígeno, forma primeramente anhídrido de telurio TeO_2 y, por oxidación más avanzada, ácido telúrico TeO_6H_6. Se combina con casi todos los metales.

El telurio se conduce de manera un poco diferente que los metaloides precedentes y ofrece ciertas analogías con los metales. En presencia de ácidos fuertes, el óxido TeO_2 puede desempeñar el papel de óxido básico.

Para la obtención del elemento, se tratan los minerales de telurio con potasa, y la solución, abandonada al aire, da lugar a la precipitación del telurio:



$$TeK_2 + \frac{1}{2} O_2 + H_2O \longrightarrow Te + 2KOH.$$

Estado natural. — Es más escaso que el selenio; se le halla combinado en diversos minerales, de los que el más importante es la silvanita (Te₂ [Ag, Au]).

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — Tratado con ácido sulfúrico concentrado, el telurio se disuelve dando color rojo; de esta solución, se obtiene un precipitado pardo de S_2Te con sulfuro de hidrógeno. Para la determinación cuantitativa, se reduce la sal a telurio y se pesa éste.

Metaloides trivalentes del grupo del nitrógeno

Nitrógeno: Reseña histórica. Propiedades físicas. Propiedades químicas. Reconocimiento. Estado natural. Preparación industrial. Preparación en el laboratorio. Aplicaciones. — **Aire atmosférico:** Reseña histórica. Separación de estos gases. Aire líquido. Propiedades físicas. Determinación cuantitativa del vapor de agua y del anhídrido carbónico. Determinación cuantitativa del oxígeno. Análisis del nitrógeno atmosférico. Composición. Propiedades químicas. — **Gases raros o gases nobles:** *Helio. Neón. Argón. Kryptón. Xenón. Radón.* — **Amoniaco:** Reseña histórica. Propiedades físicas. Propiedades químicas. Reconocimiento y determinación cuantitativa. Estado natural. Preparación industrial. Síntesis del amoniaco. Cianamida cálcica. Preparación en el laboratorio. Aplicaciones. *Compuestos metálicos derivados del amoniaco:* Amidas metálicas. Imidas metálicas. Nitruros metálicos. *Hidroxilamina:* Reseña histórica. Propiedades. Preparación. Aplicaciones. *Hidracina:* Reseña histórica. Propiedades. Preparación. Aplicaciones. *Ácido nitrhídrico:* Reseña histórica. Propiedades. Preparación. Aplicaciones. *Compuestos oxigenados del nitrógeno. Monóxido de dinitrógeno u óxido nitroso:* Reseña histórica. Propiedades. Composición. Preparación. *Monóxido de nitrógeno u oxido nítrico:* Reseña histórica. Propiedades. Preparación. *Trióxido de dinitrógeno o anhídrido nitroso y ácido nitroso. Nitritos:* Propiedades del anhídrido. Preparación. Propiedades de los nitritos. Preparación de los nitritos. *Dióxido de nitrógeno o peróxido de nitrógeno:* Reseña histórica. Propiedades. Preparación. *Pentóxido de dinitrógeno o anhídrido nítrico:* Propiedades. Preparación. *Ácido nítrico:* Reseña histórica. Propiedades físicas. Propiedades químicas. Reconocimiento y determinación cuantitativa. Agua regia. Estado natural. Industria. Aplicaciones. — **Fósforo:** Reseña histórica. Propiedades físicas y alotropía. Propiedades químicas. Estado natural. Preparación. Aplicaciones. *Fosfuros de hidrógeno:* Propiedades. Preparación. Aplicaciones. *Compuestos oxigenados del fósforo. Ácido hipofosforoso. Hipofosfitos. Anhídrido fosforoso. Ácido fosforoso. Fosfitos:* Preparación. Propiedades. *Anhídrido fosfórico. Ácido ortofosfórico. Fosfatos:* Propiedades físicas. Propiedades químicas. Industria. *Ácido pirofosfórico. Ácido metafosfórico. Ácidos peroxifosfóricos. Peroxifosfatos. Compuestos halogenados del fósforo.* Tricloruro de fósforo. Pentacloruro de fósforo. Oxicloruro de fósforo. — **Arsénico:** Reseña histórica. Propiedades físicas. Propiedades químicas. Estado natural. Preparación. Aplicaciones. *Hidrógeno arseniado:* Propiedades. Preparación. Aplicaciones. *Anhídrido arsenioso:* Propiedades físicas. Propiedades químicas. Propiedades fisiológicas y toxicológicas. Preparación. Aplicaciones. *Ácido arsenioso. Arsenitos. Anhídrido arsénico. Ácido arsénico. Arseniatos.* — **Antimonio:** Reseña histórica. Propiedades. Preparación. Aplicaciones. *Hidrógeno antimoniado:* Propiedades. Aplicaciones. *Anhídrido antimonioso. Ácido antimonioso. Anhídrido antimónico. Ácido antimónico. Antimoniatos*

Los metaloides trivalentes del grupo del nitrógeno son el *nitrógeno*, el *fósforo*, el *arsénico* y el *antimonio*.

Dan lugar a combinaciones hidrogenadas análogas, cuyo tipo es el amoniaco, y cuya estabilidad disminuye a medida que se pasa del nitrógeno al antimonio.

El nitrógeno se oxida difícilmente, y sus compuestos oxigenados son poco estables; en cambio, los otros tres elementos son muy oxidables, y sus óxidos presentan grandes analogías.

Nitrógeno (N = 14,008)

Reseña histórica. — **Priesley** observó en 1772 que al quemar carbón en un recipiente cerrado, solamente la quinta parte del aire formaba anhídrido carbónico, mientras que el resto era inapto para la combustión. En la misma época, **Rutherford** descubría que un constituyente del aire no mantenía la respiración. En 1777, **Scheele** dedujo que el aire era una mezcla de dos gases, a los que **Lavoisier** (1789) llamó oxígeno y ázoe (sin vida). **Chaptal** propuso para éste el nombre de nitrógeno (del griego, *nitron*, nitro y *gennáo*, engendra), que ha subsistido en la lengua española.

Propiedades físicas. — El nitrógeno es un gas incoloro, inodoro e insípido, un poco más ligero que el aire, difícil de licuar (hierve a — 195° C), muy poco soluble en el agua. En estado gaseoso, su molécula es diatómica. En estado líquido y sólido, es también incoloro.

Propiedades químicas. — En frío, presenta una gran inercia química; en cambio, a temperatura elevada es relativamente activo.

1° En caliente, o por efecto de una chispa eléctrica, se combina con el *hidrógeno* para dar amoniaco NH_3, pero la reacción es limitada por la disociación del amoniaco formado. En la industria se utilizan un catalizador y presiones elevadas para aumentar el rendimiento de esta reacción (v. p. 274).

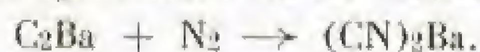
2° A temperatura elevada, o por influencia de efluvios eléctricos, el nitrógeno se combina con el *oxígeno* y da óxido nítrico, NO. La formación de este óxido es endotérmica, contrariamente a la anterior. Por lo tanto, conviene efectuarla a la temperatura más elevada que sea posible, en el arco eléctrico. Esta formación constituye el principio de la síntesis industrial del ácido nítrico (v. p. 277).

3° El nitrógeno puede fijarse igualmente sobre el *carbono* y sus compuestos: una corriente de nitrógeno que pase entre los electrodos de carbono del arco eléctrico da lugar a la formación de vestigios de cianógeno, C_2N_2. En presencia de una base o de un carbonato alcalino o alcalinotérreo, se realiza la síntesis de los cianuros:



$$4C + N_2 + CO_3Na_2 \longrightarrow 2CNNa + 3CO.$$

El nitrógeno se fija igualmente en los carburos:



$$C_2Ba + N_2 \longrightarrow (CN)_2Ba.$$

Sin embargo, con el carburo cálcico C_2Ca, no se obtiene el cianuro cálcico, sino la cianamida cálcica, utilizada como abono nitrogenado:



$$C_2Ca + N_2 \longrightarrow CN_2Ca + C.$$

4° El nitrógeno es absorbido por ciertos *metales* (litio, magnesio, calcio, aluminio). Se obtienen así los nitruros correspondientes, tales como N_2Ca_3, NAl, que se descomponen con el agua, dando amoniaco.

5° El nitrógeno es uno de los elementos primordiales para la constitución de la materia vegetal y animal. En general, la asimilación del nitrógeno tiene lugar a través de sus compuestos. Así, las plantas lo captan de los abonos nitrogenados; los animales se alimentan con estas plantas, asimilando el nitrógeno, que, ulteriormente, eliminan por la orina en forma de urea principalmente; la mayor parte de ésta es asimilada de nuevo por las plantas. De esta manera, el nitrógeno, combinado, describe un ciclo a través de los organismos vegetales y animales. La parte, muy pequeña, que queda en libertad por acción de las bacterias desnitrificantes, es compensada por el ácido nítrico formado por otras bacterias y por los efluvios eléctricos. Por otra parte, la cantidad de nitrógeno que se substrae de la atmósfera para las síntesis industriales queda equilibrada por el nitrógeno que se libera en la atmósfera por la combustión de la hulla.

Reconocimiento. — El nitrógeno no es absorbido por los reactivos utilizados para el análisis de los gases, de manera que el residuo que subsiste en tales casos es la mayoría de las veces el gas nitrógeno, lo que se comprueba provocando su absorción por el magnesio al rojo. Además, no mantiene la combustión, diferenciándose del anhídrido carbónico, que manifiesta esta misma propiedad, porque no enturbia la solución de cal apagada.

Estado natural. — El nitrógeno se encuentra, libre, en la atmósfera, en una proporción de cuatro quintos. Existe combinado en numerosos compuestos minerales (nitratos de Chile, sales amoniacales, etc.) y en muchas substancias orgánicas (albuminoides).

Preparación industrial. — Se extrae el nitrógeno del aire por destilación fraccionada del *aire líquido*; al evaporarse, éste deja primeramente en libertad nitrógeno casi puro; este método tiene la ventaja de permitir al mismo tiempo la obtención de oxígeno. Se le puede obtener también por combustión del carbono o del hidrógeno en el aire, separando el óxido de carbono y el anhídrido carbónico o el agua formados. Cuando el nitrógeno ha de servir como materia prima para la síntesis del amoniaco, se prepara la mezcla de nitrógeno e hidrógeno en las proporciones estequiométricas.

El nitrógeno se expende comprimido en tubos de acero.

Preparación en el laboratorio. — 1° Si se retira el oxígeno del aire puro, se obtiene nitrógeno mezclado con los gases raros, mezcla que se conoce con el nombre de *nitrógeno atmosférico*. Como estos gases no presentan actividad química alguna, en general no ofrecen inconvenientes.

Se puede obtener el nitrógeno atmosférico haciendo pasar una corriente de aire sobre cobre al rojo, que fija el oxígeno; igualmente, se puede absorber el oxígeno mediante cobre en frío, en presencia de amoniaco.

2° Se obtiene nitrógeno puro extrayéndolo de una combinación. Sirve muy bien para ello el nitrito amónico; como esta sal no se encuentra con facilidad, se la obtiene por reacción de un nitrito sobre una sal amónica:



$$NO_2K + ClNH_4 \longrightarrow NO_2NH_4 + ClK,$$

y se la descompone por el calor:



$$NO_2NH_4 \longrightarrow N_2 + 2H_2O.$$

COLORACIÓN DE LA LLAMA



Bario Estroncio Calcio



Sodio Potasio Litio

INDICADORES POR COLORACIÓN

ÁCIDO REACCIÓN NEUTRA BASE

Tornasol



Fenolftaleína



Heliantina



COLORACIÓN DE DETERMINADAS SALES EN SOLUCIÓN



INSOLUBILIDAD DE DETERMINADOS CLORUROS



Pb Ag Hg (sal, calomelano)

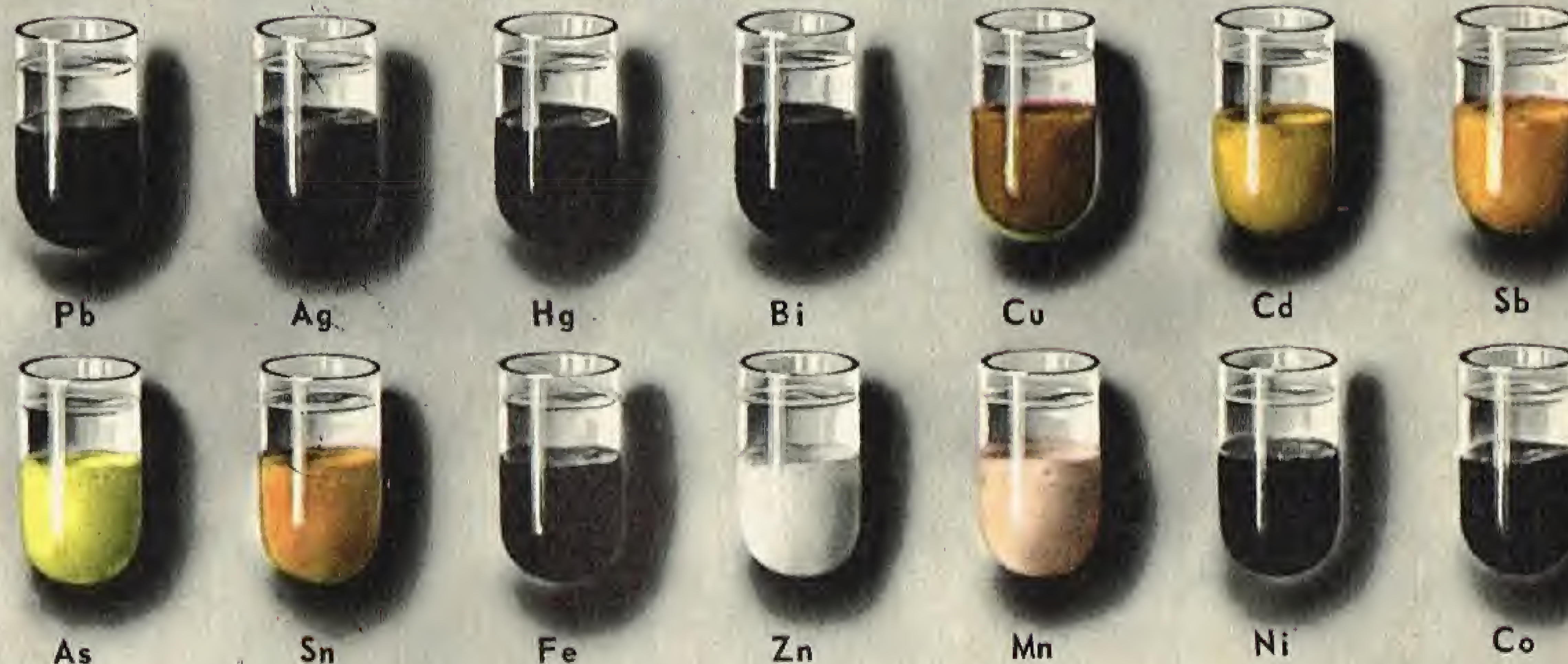
FORMACIÓN DE IONES COMPLEJOS

NÍQUEL Y AMONIACO



Cobre y amoniaco Hierro y sulfocianuro

COLORACIÓN DE VARIOS SULFUROS INSOLUBLES



REACCIONES Y PROPIEDADES UTILIZADAS EN EL ANÁLISIS CUALITATIVO QUÍMICO

EJEMPLOS DE PROPIEDADES Y DE REACCIONES UTILIZADAS EN ANÁLISIS QUÍMICO CUALITATIVO

Lo mismo en el análisis cualitativo que en el cuantitativo se utilizan « indicadores por coloración » a fin de determinar el *pH*, es decir, el grado de acidez de la solución que se estudia, y también para poder observar sus variaciones en el curso de la reacción

El análisis cualitativo moderno se basa en las propiedades características que presenta el cuerpo examinado en presencia de otros, lo que evita los complejos análisis separados de que necesitaban los antiguos métodos. Se utilizan principalmente la solubilidad y coloración de ciertos compuestos, simples o complejos. Así, por ejemplo, una precipitación por adición de ácido clorhídrico indica la presencia de plomo, plata o mercurio; la coloración amarilla de una solución permite pensar en la existencia de un cromato ya en medio neutro, ya alcalino. El color rojo, de sangre, que a parece al añadir a la solución tratada sulfocianuro de amonio señala la existencia de hierro en su grado de oxidación más elevado. En determinados casos (cuerpos alcalinos o alcalinotérreos, y cuando se trata de los últimos deben eliminarse previamente los demás cuerpos presentes), el color que adquiere una llama de mechero Bunsen (gas) puesta en contacto con la sal, o con una mezcla de sales, permite realizar el análisis en el acto



Este grabado del siglo XVII representa a Hermes Trismegisto (el tres veces grande), *considerado como el fundador de la alquimia, realizando una experiencia en una redoma de cristal* (Fot. Larousse)

Aplicaciones. — Se le emplea para la fabricación de amoniaco, de ácido nítrico y de cianamida; por lo tanto, es el producto de base de las industrias de los abonos nitrogenados, de los explosivos nitrados, de los colorantes y de las resinas sintéticas. Se le utiliza en el laboratorio cuando se requiere una atmósfera inerte, en los casos en que el oxígeno del aire podría ser perjudicial para la buena marcha de las operaciones.

Aire atmosférico

Reseña histórica. — Los antiguos creían que el aire formaba uno de los cuatro elementos, con la tierra, el agua y el fuego. **Mayow** enunció en 1667 que el aire no era un cuerpo simple. Los trabajos de **Priestley, Scheele** y **Lavoisier** pusieron de manifiesto la verdadera naturaleza del aire.

El aire es una mezcla; por destilación, se le puede fraccionar en gases de propiedades diferentes. Además del oxígeno y el nitrógeno, que son sus constituyentes principales, contiene los gases raros, o nobles (sobre todo argón), anhídrido carbónico, vapor de agua, y vestigios de otros gases, tales como el hidrógeno, el ozono, etc.

Separación de estos gases. Aire líquido. — Una vez licuado, el aire empieza a hervir hacia — 190° C. Por destilación fraccionada el nitrógeno se evapora el primero, separándose así del oxígeno (v. LICUEFACCIÓN DE LOS GASES, pág. 48).

A la presión atmosférica, el oxígeno se licúa a — 183° C, y el nitrógeno a — 195° C.

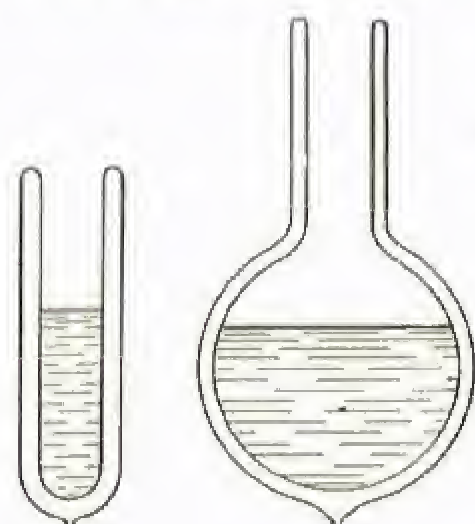


Fig. 20. — Recipientes de doble pared para conservar el aire líquido

Propiedades físicas. — En las condiciones normales de temperatura y presión, la masa específica del aire es 0,001 293, es decir, 1 centímetro cúbico de aire pesa 0,001 293 g. El aire se licúa por enfriamiento, operación que se efectúa a escala industrial; el aire líquido así obtenido se conserva en recipientes de doble (e incluso de triple) pared plateada (*fig.* 20); entre las paredes se crea un vacío casi absoluto. Los recipientes se dejan abiertos, pues en caso contrario el gas producido por volatilización ejercería una presión muy elevada en su interior; a pesar de ello, el aire se evapora sólo lentamente.

Se licúa el aire para la producción de temperaturas bajas, así como para la separación de los gases que lo constituyen, y para la fabricación de explosivos (oxiliquita).

Determinación cuantitativa del vapor de agua y del anhídrido carbónico. — Se hace pasar un volumen de aire conocido por dos series de tubos; los primeros, que contienen ácido sulfúrico, retienen el agua; los otros, con potasa, absorben el anhídrido carbónico. Se determina en una balanza el aumento de masa en cada una de las series de tubos.

Determinación cuantitativa del oxígeno. — La determinación cuantitativa del oxígeno del aire se efectúa combinando dicho elemento. Se utiliza para ello el fósforo blanco, que fija el oxígeno en frío, y el cobre, que absorbe el oxígeno cuando se le calienta al rojo. En ambos casos, se pesa el aire utilizado, y después de haber hecho el vacío, el oxígeno fijado.

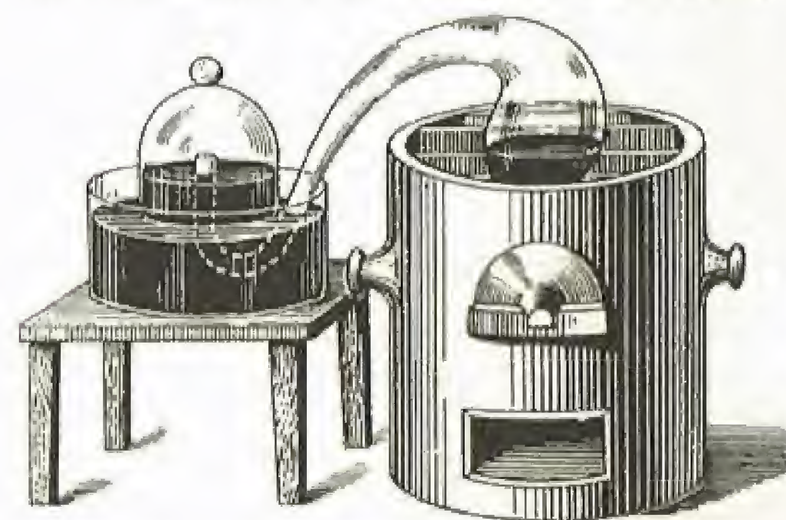


Fig. 21. — Experiencia de Lavoisier sobre el oxígeno del aire.

En una experiencia que ha pasado a la historia (*fig.* 21), Lavoisier había calentado mercurio en contacto con una cantidad de aire, y había deducido que el aire contenía dos gases, el oxígeno y el nitrógeno. Este método no conduce a resultados cuantitativos, porque la absorción del oxígeno por el mercurio es incompleta.

Análisis del nitrógeno atmosférico. — El nitrógeno extraído del aire por absorción de oxígeno y el nitrógeno obtenido por vía química no tienen la misma densidad. De esta observación dedujo Lord Rayleigh la presencia, en el nitrógeno del aire, de otro gas, al que llamó *argón*.

Se logró aislar este gas del aire por acción del magnesio, que, al rojo, absorbe a la vez el oxígeno y el nitrógeno.

Sometiendo el residuo a la destilación fraccionada, se descubrió la existencia de los demás gases raros.

Composición. — El aire puro (privado de vapor de agua, de gas carbónico y de otras impurezas) contiene:

Por cada 100 gramos: 75,5 g de nitrógeno; 23,2 g de oxígeno; 1,5 g de argón;

Por cada 100 litros: 78 l de nitrógeno; 21 l de oxígeno; 1 l de argón.

Propiedades químicas. — El aire ordinario es sobre todo activo por el oxígeno, el vapor de agua y el anhídrido carbónico que contiene. La presencia del oxígeno explica sus propiedades comburentes, que, naturalmente, son menos vivas que las del oxígeno puro. Gracias a la existencia del vapor de agua y del anhídrido carbónico, ofrece otras muchas propiedades: las substancias ávidas de agua (anhidridos, óxidos y sales anhidras) se hidratan, y los álcalis se carbonatan. Muchos metales se alteran por la acción conjugada de estos tres constituyentes: el aluminio se oxida, el hierro se transforma en óxido hidratado (orín), el cinc, el cobre y el plomo, en carbonatos básicos.

Gases raros o gases nobles

Todos estos gases pertenecen a un mismo grupo químico; son monoatómicos y están desprovistos de toda actividad química. Todos ellos existen en el aire, en la proporción siguiente: 1 litro de argón por cada 100 litros de aire; 1 litro de neón por cada 70 000; 1 litro de helio por cada 200 000; 1 litro de kryptón por cada 1 000 000; 1 litro de xenón por cada 10 000 000.

Helio (He = 4,003)

Este cuerpo, descubierto por su espectro en la cromosfera durante un eclipse de Sol (*hélios*, sol), existe también en la Tierra, en donde se origina por la desintegración de los elementos radiactivos: los rayos α, emitidos por estos cuerpos, están constituidos por átomos de helio, ionizados doblemente. Existe en el aire, en proporción pequeña, en ciertos minerales y, más abundante, en los gases de los petróleos de Tejas, por lo que América conserva prácticamente el monopolio de este elemento.

Se le separa, por licuación, de los otros gases con los que está mezclado. Su densidad es muy pequeña (0,14 con respecto al aire); de todos los gases, es el más difícil de licuar, puesto que hierve a — 268° C. En condiciones normales de presión, su punto de solidificación es tan próximo del cero absoluto que apenas se le puede alcanzar; sin embargo, aplicando una presión elevada, se le obtiene a baja temperatura en estado sólido.

Se le emplea en Estados Unidos para llenar globos, pues presenta sobre el hidrógeno la ventaja de no ser inflamable; se le utiliza también en los tubos luminiscentes y para la producción de temperaturas muy bajas.

Neón (Ne = 20,083)

Se le dio el nombre de neón (*neos*, nuevo) cuando se le separó por primera vez de la mezcla de los gases raros del aire; este método es el único que se conoce actualmente para la obtención del neón.

De todos los gases raros, es el más volátil. Hierve a — 248° C y, a presión reducida, deja pasar la corriente cuando la diferencia de potencial es pequeña, lo que determina su empleo en los tubos de neón para el alumbrado publicitario, que irradian luz anaranjada.

Argón (A = 39,944)

Debe su nombre a la inactividad (del griego *argon*, inactivo) que le caracteriza (así como a los demás gases raros). De todos éstos, es el más abundante en la atmósfera; se le retira por destilación fraccionada del aire líquido.

Es un poco más denso que el aire; hierve a — 186° C. Es un poco soluble en el agua. A causa de su inercia química y de su pequeña conductividad calorífica, sirve principalmente para constituir, puro o mezclado con nitrógeno, la atmósfera de las lámparas de incandescencia. En menor escala, se le utiliza para las lámparas luminosas de argón, que según sea la presión emiten una luz roja o azul.

Kryptón (Kr = 83,80)

Se le denominó así (del griego *krupton*, oculto) por la dificultad que hubo de vencerse para aislarlo de los demás gases raros.

Se le obtiene por destilación fraccionada del argón bruto, llamado condensado; la parte más volátil contiene argón, la media, kryptón, y la menos volátil, xenón. Es relativamente denso, hierve a — 151° C, y conduce mal el calor. Los tubos de kryptón dan una luz cuya gama de colores va desde el verde hasta el lila. Se le utiliza también para llenar las lámparas de incandescencia, pues permite obtener en el filamento una temperatura más elevada que con el argón, con la consiguiente mejora del rendimiento.

Xenón (Xe = 131,3)

Su elevada masa atómica con respecto a la densidad del aire, en el que se encuentra, hizo que se le atribuyese el nombre de xenón (del griego, *xenos*, extraño). Se le obtiene por destilación del argón bruto (v. CRYPTÓN). Hierve a — 109° C. Dada su escasa proporción en el aire, encuentra pocas aplicaciones.

Radón (Rn = 222)

(V. TRANSMUTACIONES RADIACTIVAS, p. 162.)

Amoniaco (NH_3)

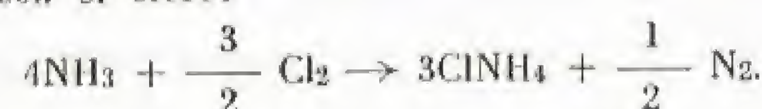
Reseña histórica. — En la Antigüedad, se extraía la *sal amoniacum* de la arena del oasis egipcio de *Ammon*, de donde procede su nombre. A principios del siglo XVII, **Kunckel** preparaba el amoniaco por medio de cal y de clorhidrato amónico.

Priestley lo aisló por vez primera en estado de gas (1774). **Berthollet** estableció su composición en 1785.

Propiedades físicas. — El amoniaco es un gas incoloro, de olor picante. Se licúa fácilmente; a la presión atmosférica hierve a — 33° C; de todos los gases, es el más soluble en el agua (1 050 volúmenes en las condiciones normales).

Propiedades químicas. — 1° El amoniaco se disocia fácilmente por el calor; a 1 000° C, la descomposición es total.

2° Su poca estabilidad explica la acción que sobre él ejercen los halógenos y el oxígeno. El amoniaco gaseoso se inflama al ponerse en contacto con el cloro:



$$4NH_3 + \frac{3}{2} Cl_2 \rightarrow 3ClNH_4 + \frac{1}{2} N_2.$$

Esta misma reacción tiene lugar en frío, entre las soluciones.

El amoniaco arde igualmente en el oxígeno:



$$2NH_3 + \frac{3}{2} O_2 \rightarrow N_2 + 3H_2O.$$

3° El platino cataliza la oxidación del amoniaco; en estas condiciones, el oxígeno se fija en el nitrógeno, dando óxido nítrico NO; esta reacción constituye el principio de la síntesis industrial del ácido nítrico (v. p. 277).

El amoniaco y sus sales se oxidan igualmente en el suelo, por influencia de los fermentos; los nitratos así formados son asimilados por las plantas. Esto explica el empleo de los compuestos amoniacales como abonos nitrogenados.

4° Con los metales alcalinos, el amoniaco da en caliente amidas metálicas, tales como NH_2Na, desprendiendo hidrógeno en la reacción. El magnesio, el calcio y el hierro se transforman en nitruros, por ejemplo, N_2Mg_3; se utiliza esta transformación en la nitruración del acero.

5° El amoniaco es absorbido con gran avidez por el agua; la solución así formada presenta *propiedades básicas*; azulea el papel de tornasol, y da con los ácidos compuestos de adición llamados *sales amónicas* (tienen todas las propiedades de las sales, aunque no contienen metal alguno). Reacciona igualmente con las soluciones salinas, precipitando el hidróxido insoluble correspondiente.

La analogía de las propiedades de las sales amónicas y las sales potásicas ha conducido a poner en evidencia, en la fórmula de las primeras, el grupo NH_4, llamado *radical amonio*, que desempeña el papel de un metal, pero que nunca se ha conseguido aislar. Así, se escribe: cloruro amónico $ClNH_4$, sulfato ácido de amonio SO_4HNH_4, sulfato amónico $SO_4(NH_4)_2$.

Igualmente, se considera que la solución amoniacal contiene hidróxido amónico NH_4OH.

6° El amoniaco da con numerosas sales *productos de adición*, disociables por el calor, llamados aminas; citemos los cloruros de plata amoniacales, así como los complejos cuproamoniacales obtenidos por acción del amoniaco sobre los compuestos cúpricos (licor de Schweitzer). Es precisamente por esta razón por lo que no se puede deshidratar con cloruro cálcico.



Miniatura alemana de un tratado de alquimia (segunda mitad del siglo XVI) [*Fot. Larousse*]

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — El amoniaco da con el ácido clorhídrico humos blancos de cloruro amónico; una sal amónica, tratada con potasa, deja en libertad amoniaco. El reactivo de Nessler (yoduro mercúrico, yoduro potásico y potasa) da, en presencia de vestigios de amoniaco, un precipitado pardo rojizo. La determinación cuantitativa del amoniaco se realiza neutralizándolo con una solución valorada de ácido sulfúrico.

Estado natural. — La descomposición de las materias orgánicas nitrogenadas da lugar a la formación de amoniaco o de sales amónicas; así, la fermentación de la urea de carbonato amónico:



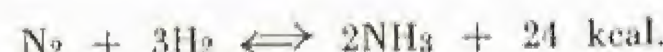
$$CO(NH_2)_2 + 2H_2O \rightarrow CO_3(NH_4)_2.$$

Las aguas de lavado del gas de alumbrado contienen sulfuro y carbonato amónico.

Preparación industrial. — Se extraen grandes cantidades de amoniaco de los carbones (antracita, lignito, turba y, sobre todo, hulla), que, por destilación seca, dejan en libertad el nitrógeno que contienen y que entonces se presenta en estado libre (N_2) o combinado (C_2N_2, NH_3, sales amónicas).

Pero, cada vez más, el amoniaco se obtiene por síntesis a partir de sus elementos.

Síntesis del amoniaco. — Dado el consumo de día en día mayor de abonos nitrogenados, ha sido preciso recurrir a la obtención del amoniaco por síntesis. Para ello, se envía una mezcla de hidrógeno y nitrógeno sobre un catalizador (*fig.* 22), en donde se verifica la reacción:



$$N_2 + 3H_2 \Longleftrightarrow 2NH_3 + 24 \text{ kcal}.$$

Puesto que la reacción es exotérmica y va acompañada por una contracción de volumen, se aumentará el rendimiento de la reacción operando a temperatura baja y a presión elevada (ley de desplazamiento del equilibrio). El catalizador es a base de hierro y de alúmina.

En el procedimiento *Haber*, se extrae el hidrógeno del gas de agua (v. pág. 259) por peroxidación del óxido de carbono.

Se comprime la mezcla a 25 atmósferas y se la lava con agua, que disuelve casi todo el anhídrido carbónico formado. Una nueva compresión a 200 atmósferas permite eliminar el óxido de carbono, que es absorbido por el formiato cuproso amoniacal, y el anhídrido carbónico residual, por lavado con una solución acuosa de cal.

El gas obtenido después del paso por el catalizador contiene 6% de amoniaco.

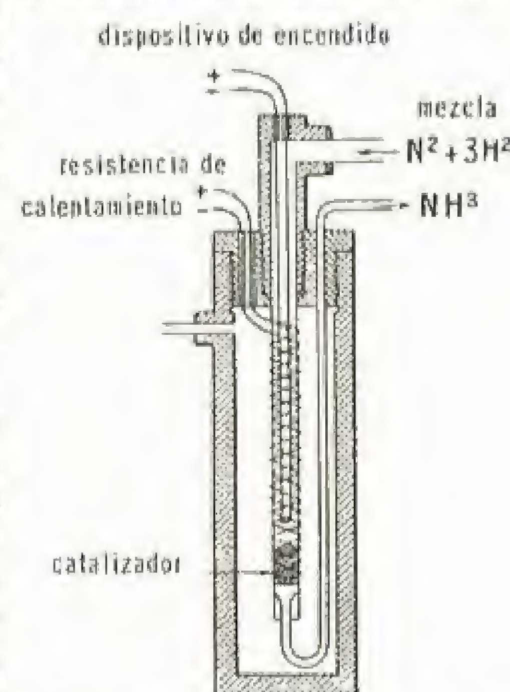


Fig. 22. — Tubo con catalizador para la preparación del amoniaco

En el procedimiento *Claude*, se extrae el hidrógeno de los hornos de coque (v. p. 259); la presión utilizada es de 1 000 atmósferas; una vez pasada la mezcla por el catalizador, a 600° C, el rendimiento es de 40%.

Actualmente, se emplean preferentemente presiones intermedias (de 500 a 700 atmósferas), suficientes para que el gas, a la temperatura ordinaria, dé amoniaco líquido.

Cianamida cálcica. — Se puede preparar el amoniaco por una síntesis indirecta, tratando la *cianamida cálcica* (v. p. 273) con agua caliente a presión:



$$CN_2Ca + 3H_2O \Longleftrightarrow CO_3Ca + 2NH_3.$$

Se utiliza también la cianamida como abono, pues se transforma en el suelo en carbonato amónico.

Preparación en el laboratorio. — Se forma amoniaco calentando en un recipiente una mezcla de cloruro amónico e hidróxido cálcico:



$$2ClNH_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow Cl_2Ca + 2NH_3 + 2H_2O.$$

El amoniaco así obtenido, se deshidrata con cal viva.

Corrientemente, se utiliza el gas amoniaco licuado que se vende en tubos de acero.

Aplicaciones. — Las sales amoniacales (sobre todo el sulfato) sirven como abonos; además de esta aplicación, la más importante del amoniaco, se utiliza éste como materia prima en la industria del ácido

do nítrico. Se le emplea también para preparar carbonato sódico (procedimiento Solvay) y para desengrasar la lana.

El amoniaco licuado sirve para obtener temperaturas bajas.

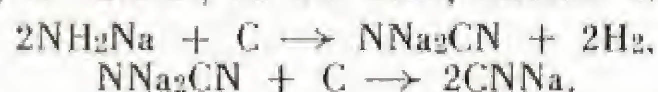
Compuestos metálicos derivados del amoniaco

Amidas metálicas. — Si se hace pasar una corriente de amoniaco sobre sodio calentado a 300° C, se forma la amida sódica:



$$2NH_3 + 2Na \longrightarrow 2NH_2Na + H_2.$$

Es un cuerpo blanco, de aspecto cristalino. Calentando la amida sódica con carbón, se obtiene, en dos fases, cianuro sódico:



$$2NH_2Na + C \longrightarrow NNa_2CN + 2H_2,$$
$$NNa_2CN + C \longrightarrow 2CNNa.$$

Esta reacción sirve para la preparación técnica del cianuro.

Imidas metálicas. — Por substitución de dos H del amoniaco, se obtienen las imidas; la más importante es la imida de plomo, NHPb, que presenta carácter explosivo.

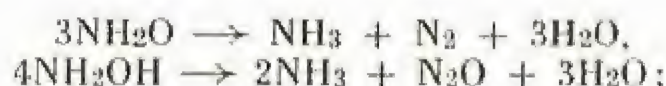
Nitruros metálicos. — La substitución de los tres H del amoniaco por un metal da lugar a los compuestos llamados nitruros; generalmente son muy inestables, y se descomponen por acción del agua, dando hidróxidos y amoniaco.

Hidroxilamina (NH_2OH)

Reseña histórica. — Descubierta por **Lossen** (1865), **Lobry de Bruyn** la preparó poco después en estado puro.

Propiedades. — 1° La hidroxilamina es un cuerpo incoloro cristalino, soluble en el agua en todas las proporciones.

2° Endotérmica, es poco estable y se descompone fácilmente en nitrógeno, óxido nitroso y amoniaco, lo que ocurre por dos procesos simultáneos:



$$3NH_2O \longrightarrow NH_3 + N_2 + 3H_2O,$$
$$4NH_2OH \longrightarrow 2NH_3 + N_2O + 3H_2O;$$

por esta razón, es muy reductora y su solución se oxida cuando está expuesta al aire.

3° Tiene propiedades básicas análogas a las del amoniaco y da con los ácidos sales de hidroxilamonio, de las que las más importantes son el cloruro, $ClNH_3OH$, y el nitrito, NO_2NH_3OH.

Preparación. — Se la obtiene por reducción del ácido nítrico diluido, operación que se lleva a cabo con el cinc y el cloruro estannoso; al lado de la hidroxilamina, que queda en forma de sal con el ácido, se obtienen otros cuerpos; por ulterior tratamiento de la sal con una base anhidra y purificación por destilación, se forma hidroxilamina pura.

Aplicaciones. — Se utilizan las sales de hidroxilamina e hidroxilamonio en análisis, como reductores.

Hidracina (NH_2NH_2)

Reseña histórica. — Fue obtenida por vez primera por **Curtius** (en 1889).

Propiedades. — Es un reductor enérgico, en cuya acción se oxida generalmente a nitrógeno elemental. Se combina con uno o varios equivalentes de ácido, para dar las sales llamadas de hidrazonio.

Preparación. — Se forma por reacción de amoniaco sobre hipoclorito sódico.

Aplicaciones. — Al igual que la hidroxilamina, se emplean la hidracina y las sales de hidrazonio como reductores.

Ácido nitrhídrico (N_3H)

Reseña histórica. — Fue descubierto por **Curtius** en 1890.

Propiedades. — El ácido anhidro es un líquido incoloro, de olor intenso. Manifiesta propiedades ácidas muy débiles, y actúa como reductor, liberando nitrógeno.

Preparación. — Se forma por acción de la hidracina sobre el ácido nitroso; en una primera fase, se obtiene nitrito de hidrazonio, que se desdobla en ácido nitrhídrico y agua:



$$NO_2N_2H_5 \longrightarrow N_3H + 2H_2O.$$

Aplicaciones. — Se emplea sobre todo una de sus sales, la azida de plomo, $(N_3)_2Pb$, como excitadora de explosiones.

Compuestos oxigenados del nitrógeno

Los compuestos binarios del nitrógeno son muy numerosos, a saber: el monóxido de dinitrógeno, N_2O; el monóxido de nitrógeno, NO; el trióxido de dinitrógeno, N_2O_3; el dióxido de nitrógeno, NO_2; el pentóxido de dinitrógeno, N_2O_5; el trióxido de nitrógeno, NO_3.

Los principales ácidos correspondientes son el ácido nitroso, NO_2H, y el ácido nítrico, NO_3H.

Los óxidos de nitrógeno son endotérmicos; por consiguiente, son poco estables y presentan carácter oxidante.

Monóxido de dinitrógeno u óxido nitroso (N_2O)

Reseña histórica. — Fue descubierto por **Priestley** en 1772, quien lo obtuvo por descomposición del nitrato amónico.



$$NO_3NH_4 \longrightarrow N_2O + 2H_2O.$$

Propiedades. — 1° Es un gas incoloro, de sabor dulce, bastante difícil de licuar, relativamente soluble en el agua.

2° En dosis pequeñas, es excitante del sistema nervioso *(gas hilarante)*; se le utiliza en cirugía como anestésico.

3° Se descompone en sus elementos por encima de 500° C, dando una mezcla de nitrógeno y oxígeno; el oxígeno desprendido en esta reacción se encuentra en mayor proporción que el contenido en el aire.

4° Por esta razón, mantiene todas las combustiones vivas (hidrógeno, azufre, fósforo, carbono, sodio, magnesio).

Como el oxígeno, aviva la llama en un pedazo de madera que presente un punto de ignición.

En cambio, no mantiene las combustiones lentas ni la respiración.

Composición. — La composición de este óxido, como la de todos los demás óxidos del nitrógeno, se deduce por análisis en un tubo acodado, en presencia de potasio.

Preparación. — Se le prepara por descomposición del nitrato amónico; como la reacción ocurre con gran desprendimiento de calor, hay que proceder con cuidado; en general se calienta la sal hasta lograr su fusión, y a continuación se deja de calentar; si a pesar de ello la reacción es muy viva, se refrigera el recipiente en que tiene lugar la descomposición, envolviéndolo con un paño húmedo.

Monóxido de nitrógeno u óxido nítrico (NO)

Reseña histórica. — Fue descubierto por **Hales** en 1772.

Propiedades. — 1° Es un gas incoloro, muy difícil de licuar y muy poco soluble en el agua.

2° Su formación a partir de sus elementos es endotérmica; es estable solamente a temperaturas muy elevadas. Sin embargo, en frío es metastable y no se descompone por debajo de 1 000° C.

3° Por esta razón, las combustiones en una atmósfera de óxido nítrico tienen lugar solamente si la temperatura es suficientemente elevada. Con el hidrógeno, no da mezcla detonante; no reaviva la llama en un pedazo de madera que tenga un punto en ignición; en cambio, el magnesio y el fósforo se queman en el óxido nítrico.

4° El oxígeno se fija en frío en el óxido nítrico, cuya molécula no está saturada; según sea la proporción de la mezcla, se originan trióxido de dinitrógeno, N_2O_3, o dióxido de nitrógeno, NO_2. En presencia de agua, se obtienen ácido nitroso y ácido nítrico.

El monóxido de nitrógeno fija igualmente cloro, dando el cloruro de ácido del ácido nitroso, NOCl, gas rojo; es absorbido por los dióxidos metálicos, con los que forma el nitrito correspondiente.

5° Las soluciones de sulfato ferroso lo absorben, dando un compuesto de adición pardo, que se disocia por el calor; esta reacción sirve para reconocerlo y también para purificarlo.

Preparación. — 1° Se le obtiene por reducción del ácido nítrico diluido con virutas de cobre en frío:



$$8NO_3H + 3Cu \longrightarrow 3(NO_3)_2Cu + 2NO + 4H_2O.$$

2° Se obtiene óxido nítrico puro tratando el ácido nítrico con sulfato ferroso en caliente:



$$6SO_4Fe + 3SO_4H_2 + 2NO_3H \longrightarrow 3(SO_4)_3Fe_2 + 2NO + 4H_2O.$$

3° En la industria, se le prepara únicamente para su empleo ulterior en la fabricación de ácido nítrico; para ello, se hace pasar aire en un arco eléctrico, o se oxida el amoniaco sobre un catalizador adecuado (v. p. 277).

Trióxido de dinitrógeno o anhídrido nitroso y ácido nitroso (N_2O_3 y NO_2H)
Nitritos

Propiedades del anhídrido. — Es un líquido azul obscuro, que hierve a — 3° C, dando vapores que se disocian inmediatamente:

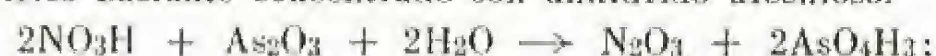


$$N_2O_3 \Longleftrightarrow NO + NO_2.$$

Con el hielo fundente, da una mezcla de ácido nítrico y ácido nitroso. A la temperatura ordinaria, éste, inestable, se descompone en ácido nítrico y óxido nítrico.

Por reacción con un álcali, se obtiene el nitrito correspondiente, sal del ácido nitroso NO_2H.

Preparación. — 1° Se forma anhídrido nitroso en la reacción del ácido nítrico bastante concentrado con anhídrido arsenioso.



$$2NO_3H + As_2O_3 + 2H_2O \longrightarrow N_2O_3 + 2AsO_4H_3;$$

la presencia de cantidades muy pequeñas de sales de mercurio cataliza positivamente esta formación.

2º Se enfría a — 40º C una mezcla de oxígeno y óxido nítrico, NO, en exceso. Se obtiene así el anhidrido nitroso en estado líquido.

Propiedades de los nitritos. — El ácido nitroso no existe en libertad. Sin embargo, sus sales, los nitritos, son bien conocidas. Estas sales son relativamente estables, mientras no se encuentren en solución ácida.

En este último caso, pueden obrar, ya como *oxidantes*, produciendo nitrógeno o un óxido inferior, ya como *reductores*, transformándose entonces en nitratos.

Reducen el permanganato potásico, el ácido crómico y el cloruro de oro.

Oxidan el ácido sulfuroso, el yoduro potásico y las sales ferrosas, dando óxido nítrico.

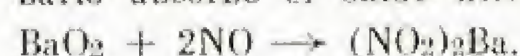
Su aplicación más importante reside en la acción que ejercen sobre las anilinas, con las que forman los *diazoicos*, que sirven para la obtención de numerosos colorantes (colorantes *azoicos*).

Se reconocen los nitritos tratándolos con un ácido que, en frío, provoca un desprendimiento de vapores rutilantes (mezcla de NO, N_2O_3 y NO_2).

Preparación de los nitritos. — 1º Los nitritos se obtienen en la industria al mismo tiempo que los nitratos, a partir del dióxido de nitrógeno sintético (véase más adelante).

2º Los nitritos alcalinos se pueden preparar calcinando los nitratos correspondientes, en contacto con limaduras de plomo, que fijan el oxígeno. A continuación se separa el nitrato disolviéndolo en alcohol hirviendo.

3º El bióxido de bario absorbe el óxido nítrico en caliente:



$$BaO_2 + 2NO \rightarrow (NO_2)_2Ba.$$

Por doble descomposición con un sulfato, se pasa del nitrito de bario a otro nitrito cualquiera.

Dióxido de nitrógeno o peróxido de nitrógeno (NO_2)

Reseña histórica. — Fue estudiado primeramente por **Dulong, Gay-Lussac, Peligot** y **Mitscherlich.**

Propiedades. — 1º Este cuerpo es incoloro en estado sólido e igualmente en estado líquido, cuando la temperatura es de 0º C; al elevar la temperatura, tiende al amarillo; hierve a 22º C, dando vapores rojos que se obscurecen a medida que aumenta la temperatura; al mismo tiempo, disminuye la densidad de vapor.

Estos fenómenos se interpretan por la disociación de las moléculas N_2O_4, estables en frío e incoloras:



$$N_2O_4 \rightleftarrows 2NO_2.$$

2º A su vez, las moléculas NO_2 se disocian en la zona de temperatura comprendida entre 200 y 600º C, dando óxido nítrico y oxígeno. Por consiguiente, el dióxido de nitrógeno es comburente, y, a este respecto, se sitúa entre el óxido nítrico y el óxido nitroso.

3º Se conduce como un anhidrido mixto, capaz de desdoblarse según la ecuación:



$$4NO_2 \rightarrow N_2O_3 + N_2O_5.$$

Mezclándolo con agua fría, da los dos ácidos, que se superponen por orden de densidad (el ácido nitroso en el fondo):



$$2NO_2 + H_2O \rightarrow NO_2H + NO_3H.$$

A la temperatura ordinaria, el ácido nitroso, inestable, se descompone de acuerdo con la reacción:



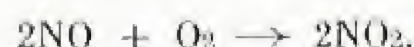
$$3NO_2H \rightarrow 2NO + NO_3H + H_2O.$$

Los álcalis absorben el dióxido de nitrógeno, dando una mezcla de nitratos y nitritos:



$$2NO_2 + 2NaOH \rightarrow NO_3Na + NO_2Na + H_2O.$$

Preparación. — 1º En la industria, se le obtiene por oxidación del óxido nítrico en frío:



$$2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2.$$

2º En el laboratorio, se le prepara puro descomponiendo por el calor el nitrato de plomo, previamente deshidratado:



$$2(NO_3)_2Pb \rightarrow 2PbO + 4NO_2 + O_2.$$

Los vapores que se desprenden en la reacción son recogidos en una vasija enfriada con una mezcla frigorífica, con lo que se condensan.

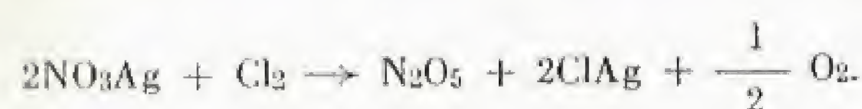
Pentóxido de dinitrógeno o anhídrido nítrico (N_2O_5)

Propiedades. — Es un sólido blanco que se descompone a la temperatura ordinaria en dióxido de nitrógeno y oxígeno.

En contacto con el agua, da ácido nítrico.

Preparación. — Se deshidrata el ácido nítrico fumante con anhídrido fosfórico. Para ello, se destila en el vacío, a la temperatura ordinaria, la mezcla de estos dos cuerpos; enfriando los vapores recogidos, se forman en la vasija dos capas, de las cuales la superior es de pentóxido y la inferior de ácido nítrico, que se separan mediante un embudo.

Se puede obtener también por reacción del cloro sobre el nitrato de plata:



$$2NO_3Ag + Cl_2 \rightarrow N_2O_5 + 2ClAg + \frac{1}{2} O_2.$$

Ácido nítrico (NO_3H)

Reseña histórica. — **Geber** observó su existencia en el siglo VIII. Con el nombre de *agua fuerte*, se le preparó durante largo tiempo por el método de **Raimundo Lulio**, calcinando una mezcla de nitro y arcilla. Su fabricación en gran escala no tuvo lugar antes de fines del siglo XVIII, es decir, a partir del momento en que se inició la industria del ácido sulfúrico.

Durante el siglo XIX, se le obtenía del nitrato de Chile.

En el siglo, XX se han descubierto dos procedimientos de síntesis, uno a partir del aire, en el arco eléctrico, utilizado en Noruega por **Birkeland** (1904), otro, más importante, por oxidación catalítica del amoniaco, debido a **Ostwald** (1909).

Propiedades físicas. — En el comercio se encuentran dos tipos de ácido nítrico:

1º El *ácido monohidratado*, $N_2O_5H_2O$, o NO_3H (ácido fumante, a 48º Baumé), que es un líquido muy fumante al aire, peligroso, de color amarillo. Hierve por debajo de 100º C y se descompone:



$$2NO_3H \rightarrow N_2O_5 + H_2O.$$

A medida que el líquido se empobrece en anhidrido, se obtiene el segundo ácido:

2º El *ácido ordinario*, o *tetrahidratado*, que es una mezcla aceotrópica obtenida por destilación de un ácido de cualquier concentración. Responde aproximadamente a la fórmula $N_2O_5 + 4H_2O$, de donde procede su nombre. Es un líquido incoloro, que no desprende humos como el anterior.

Propiedades químicas. — 1º El ácido nítrico, que se descompone fácilmente en agua, dióxido de nitrógeno y oxígeno, es un oxidante enérgico, sobre todo cuando está concentrado y en caliente.

Oxida los *metaloides* hasta el máximo (el H, el I, el S, el P y el C dan H_2O, IO_3H, SO_4H_2, PO_4H_3 y CO_2), así como sus compuestos suboxigenados (SO_2, As_2O_3).

En presencia de platino, el hidrógeno lo transforma incluso en amoniaco.

Oxida numerosas substancias orgánicas, inflama la esencia de trementina, transforma el azúcar en ácido oxálico, quema la piel y los tejidos.

2º Es un *ácido* muy fuerte, como se deduce del estudio de su disociación electrolítica.

Reacciona con las bases dando sales neutras, los *nitratos*, todas ellas solubles en el agua y oxidantes como el ácido.

Ataca todos los *metales*, excepto al oro y al platino; en estas acciones, no se desprende hidrógeno, porque el ácido es demasiado oxidante.

Cuando se trata de un ácido bastante concentrado, se forma una mezcla de óxidos de nitrógeno, en la que predomina el NO si se opera con cobre, y el N_2O si se emplea hierro o cinc. En solución muy diluida, estos últimos metales dan amoniaco e hidroxilamina, que posteriormente son transformados en nitratos por el ácido.

Con los *alcoholes* da ésteres, de los que los más importantes son: el éster trinítrico de la glicerina, generalmente llamado *nitroglicerina* $C_3H_5(NO_3)_3$, líquido explosivo, cuya mezcla con arena constituye la *dinamita*; los ésteres nítricos de la celulosa, llamados *nitrocelulosas*, entre los que destacaremos el algodón pólvora (otros sirven para fabricar el colodión y el celuloide).

3º Con los hidrocarburos bencénicos y con sus compuestos da reacciones de nitración, cuyo tipo es:



$$C_6H_6 + NO_3H \rightarrow C_6H_5NO_2 + H_2O.$$

El nitrobenceno, $C_6H_5NO_2$, tratado por el hidrógeno naciente, se transforma en *anilina*, $C_6H_5NH_2$.

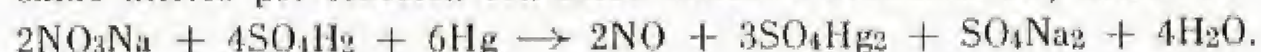
De los demás derivados nitrados, se pueden citar el trinitrofenol o ácido pícrico, $C_6H_2(NO_2)_3OH$, explosivo *(melinita)* y colorante, y el trinitrotolueno, $C_6H_2(NO_2)_3CH_3$.

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — El ácido nítrico, o un nitrato, calentado con ácido sulfúrico y virutas de cobre, provoca un desprendimiento de vapores nitrosos.

Un cristal de sulfato ferroso adquiere color pardo al ponerse en contacto con ácido sulfúrico que contenga productos nitrosos (v. página 275).

Es muy sensible la reacción del anión nitrato con la difenilamina, que, en solución con ácido sulfúrico, da una coloración azul muy intensa.

Para la determinación cuantitativa del ácido nítrico y de los nitratos, se emplea el procedimiento de Lunge, que se basa en su reducción a óxido nítrico por reacción con ácido sulfúrico concentrado y mercurio:



$$2NO_3Na + 4SO_4H_2 + 6Hg \rightarrow 2NO + 3SO_4Hg_2 + SO_4Na_2 + 4H_2O.$$

Agua regia. — Es una mezcla de ácido clorhídrico y ácido nítrico, en proporciones variables. Se presenta en forma de un líquido amarillo; es un oxidante y un clorurante muy enérgico, debido al cloro atómico que se origina en la reacción:



$$3ClH + NO_3H \rightarrow 2Cl + ClNO + 2H_2O,$$

y que es capaz de combinarse con el oro y con el platino, dando los cloruros correspondientes.

Se le emplea para disolver el oro y el platino, de donde se deriva su nombre.

Estado natural. — Se encuentra en yacimientos abundantes de nitrato sódico, NO_3Na, en Chile. En ciertas regiones, se forman en las paredes húmedas (bodegas, etc.) eflorescencias de nitrato cálcico o salitre. Los compuestos amoniacales se transforman en el suelo en nitratos (nitrificación).

Se obtiene generalmente por tres procedimientos distintos.

Industria. — 1º *A partir del nitrato.* Se purifica el nitrato de Chile por cristalizaciones sucesivas, y se le trata en caliente por el ácido sulfúrico:



$$NO_3Na + SO_4H_2 \longrightarrow SO_4HNa + NO_3H.$$

Hay que mantener la temperatura por debajo de 150º C, para evitar la descomposición del ácido formado.

Los vapores circulan en unas bombonas, en las que se condensan, y pasan luego a una torre de absorción, en donde reciben una lluvia de agua.

Se blanquea el ácido calentándolo en una corriente de aire, que arrastra los vapores nitrosos disueltos; se elimina el ácido clorhídrico, procedente de los cloruros contenidos en el nitrato, por tratamiento con nitrato de plata.

Este procedimiento es el más antiguo. Durante la primera guerra mundial, los alemanes se vieron privados de nitrato, por lo que tuvieron que recurrir a procedimientos de síntesis, que han adquirido después gran extensión.

2º *Síntesis directa.* Ya hemos visto (v. p. 272) que el nitrógeno y el oxígeno se combinan a temperatura elevada:



$$N_2 + O_2 \rightleftharpoons 2NO.$$

Desde el punto de vista del rendimiento, conviene calentar los gases a la temperatura más alta que sea posible; a continuación, hay que enfriarlos bruscamente para evitar la descomposición completa del óxido nítrico formado. Para ello, se envía una corriente de aire muy rápida a un arco eléctrico. Los gases, que salen rápidamente de la región caliente, se enfrían hasta una temperatura a la que los óxidos de nitrógeno son estables, y a la que el exceso de oxígeno transforma el óxido nítrico en dióxido.

Se les hace pasar después por las torres de absorción, en las que tiene lugar la reacción siguiente, por contacto con agua:



$$4NO_2 + O_2 + 2H_2O \longrightarrow 4NO_3H.$$

Se puede igualmente enviar los gases hasta una solución alcalina, con la que reaccionan dando una mezcla de nitrato y nitrito.

El rendimiento de este procedimiento es bajo y el consumo de energía eléctrica considerable; por tal razón, se le utiliza cada vez menos, cediendo el paso al procedimiento que vamos a describir más adelante.

El ácido obtenido es muy diluido, aunque puro, y se le emplea sobre todo para fabricar nitrato cálcico.

3º *Síntesis indirecta.* Se envía una mezcla de aire y amoniaco gaseoso sobre un catalizador constituido por una tela metálica muy cerrada de alambres de platino muy finos. Al ponerse en contacto con el catalizador, tiene lugar la reacción:



$$4NH_3 + 5O_2 \longrightarrow 4NO + 6H_2O.$$

El óxido nítrico se transforma y es absorbido como en el procedimiento precedente.

La síntesis industrial del amoniaco, que ha adquirido gran desarrollo sobre todo después de la guerra de 1914, ha dado un impulso considerable a este método de fabricación, que es actualmente el más importante.

Aplicaciones. — Los nitratos de sodio y de calcio se emplean como abonos.

El ácido fumante sirve para la fabricación de los derivados nitrados; por consiguiente, se le emplea en las industrias de los explosivos, de los colorantes y de las resinas sintéticas.

El ácido diluido, llamado agua fuerte, sirve para grabar el cobre.

Fósforo (P = 30,975)

Reseña histórica. — El alquimista **Brandt**, de Hamburgo, obtuvo el fósforo cuando intentaba preparar con la orina un líquido capaz de transformar la plata en oro (1669).

El descubrimiento del fosfato de cal por **Gahn** (1769) procuró una materia prima más abundante que la orina. De todas maneras, el fósforo siguió costando muy caro hasta que **Scheele,** en 1775, lo preparó a partir de los huesos.

Su nombre (del griego *phôs*, luz, y *phoros*, que lleva) recuerda la propiedad que tiene de emitir luz.

Propiedades físicas y alotropía. — El fósforo es un sólido polimorfo, del que se conocen bien diversas variedades.

1º El fósforo *blanco*, o incoloro, es ambarino, translúcido y blando, funde a 44º C y permanece fácilmente en sobrefusión. Se disuelve en el sulfuro de carbono y cristaliza en el sistema regular; porque sus cristales, expuestos a la luz, se cubren con una capa muy tenue de fósforo violeta, que les confiere un color amarillento, se le llama en el comercio, erróneamente, fósforo amarillo. Es un veneno muy violento.

2º El fósforo *rojo*, más denso que el precedente, tiene un color que varía del rosa al violeta, por lo que también se le llama fósforo violeta. Se sublima sin fusión y, al contrario de la variedad blanca, es prácticamente insoluble en el sulfuro de carbono y en los demás disolventes orgánicos; se le puede obtener cristalizado por disolución en plomo fundido (fósforo metálico o fósforo de Hittorf). No es tóxico.

3º El fósforo *negro*, obtenido por Bridgman a presión elevada, es el más denso; además, es el menos soluble y, por consiguiente, el más estable.

4º A temperatura moderada, el vapor de fósforo es tetraatómico, como se deduce del estudio de su densidad.

Propiedades químicas. — El fósforo blanco, el fósforo rojo y el fósforo negro, que dan lugar a las mismas combinaciones, son tres variedades alotrópicas de un mismo cuerpo simple. La transformación del fósforo blanco en fósforo rojo es exotérmica, por lo que las reacciones del primero son más vivas.

El fósforo difiere del nitrógeno por su menor afinidad frente al hidrógeno; en cambio, sus combinaciones cloradas y oxigenadas son mucho más estables que las del nitrógeno.

1º El fósforo blanco se inflama en el aire a 60º C; el fósforo rojo se inflama también, aunque con mayor dificultad; en ambos casos, se obtiene anhídrido fosfórico, P_2O_5, reacción que va acompañada por una intensa emisión de luz. El fósforo negro no se inflama en absoluto.

Por su parte, el fósforo blanco, expuesto al aire, en frío, sufre una combustión lenta, acompañada de fosforescencia, en la que se forma sobre todo anhídrido fosforoso P_2O_3. El calor que se desprende en esta reacción explica la inflamación espontánea del fósforo blanco, que ocurre frecuentemente.

2º Por consiguiente, el fósforo es reductor: con el vapor de agua da, a 250º C, hidrógeno fosforado y ácido fosfórico; a ebullición, reacciona con las soluciones alcalinas, formando hiposulfitos.

El ácido nítrico lo oxida al estado de ácido ortofosfórico.

3º El fósforo se inflama espontáneamente en el cloro, produciendo los cloruros PCl_3 y PCl_5; se inflama igualmente al ponerse en contacto con bromo y yodo.

4º El fósforo no reacciona con el hidrógeno; en cambio, se combina en caliente con numerosos metales. Los fosfuros (P_2Ca_3, P_2Mg_3) se descomponen por el agua.

5º Se combina con el azufre, dando el sexquisulfuro P_4S_3, utilizado en las cerillas.

6º Al igual que el nitrógeno, el fósforo describe un ciclo en la naturaleza: las plantas lo extraen del suelo y luego pasa a los organismos animales, que, finalmente, lo reintegran en forma de excrementos.

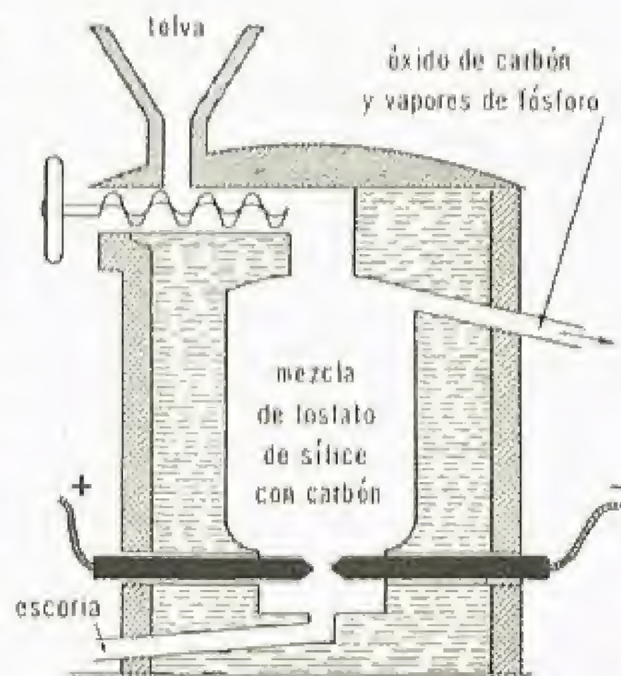


Fig. 23. — Preparación del fósforo en el horno eléctrico

Estado natural. — El fósforo se encuentra principalmente en el suelo en forma de fosfato tricálcico (África del Norte). Esta misma sal existe en los huesos de los vertebrados. Por acumulación de los caparazones de moluscos, se han originado yacimientos de fosfatos que se explotan actualmente.

Preparación. — 1º Se prepara el **fósforo blanco** tratando en el horno eléctrico el fosfato tricálcico pulverizado por una mezcla de arena silícea y carbón (*fig.* 23): la sílice desplaza el anhídrido fosfórico, que es reducido por el carbón; el silicato cálcico fundido fluye, y es evacuado, mientras que el vapor de fósforo se condensa con agua fría:



$$(PO_4)_2Ca_3 + 3SiO_2 \longrightarrow 3SiO_3Ca + P_2O_5,$$



$$P_2O_5 + 5C \longrightarrow \frac{1}{2} P_4 + 5CO.$$

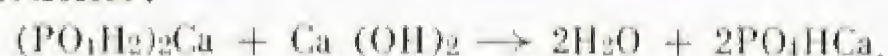
Se le purifica por dos filtraciones sucesivas a 50-60º C, una con negro animal y otra a través de una piel de gamuza.

2º Por reacción del fosfato tricálcico (huesos) con ácido clorhídrico, se obtiene el monofosfato:

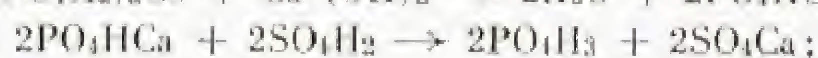


$$(PO_4)_2Ca_3 + 4ClH \longrightarrow (PO_4H_2)_2Ca + 2Cl_2Ca,$$

que tratado primeramente con cal apagada y luego con ácido sulfúrico, da ácido fosfórico:



$$(PO_4H_2)_2Ca + Ca\,(OH)_2 \longrightarrow 2H_2O + 2PO_4HCa,$$



$$2PO_4HCa + 2SO_4H_2 \longrightarrow 2PO_4H_3 + 2SO_4Ca;$$

se elimina el sulfato cálcico, y se reduce el ácido fosfórico con carbón al rojo blanco:



$$2PO_4H_3 + 5C \longrightarrow \frac{1}{2} P_4 + 5CO + 3H_2O.$$

3º Se prepara el **fósforo rojo** calentando durante largo tiempo el fósforo blanco a 280º C, en una atmósfera inerte de vapor de agua. El residuo se pulveriza y se trata con sulfuro de carbono, que disuelve el fósforo blanco que no se haya transformado.

Aplicaciones. — El fósforo sirve desde hace poco tiempo para la fabricación sintética del fosfato amónico, abono fosfatado y nitrado al mismo tiempo. Se le utiliza igualmente para la fabricación de cerillas, prismas de madera que se sumergen en azufre fundido y luego se cubren con una pasta de sexquisulfuro de fósforo, clorato potásico, polvo de vidrio y cola. Forma parte de la composición de ciertos bronces (se hace pasar fósforo en estado de vapor sobre pedazos de cobre calentados al rojo en una retorta vertical).

En el laboratorio, se le emplea como reductor. Sirve también para elaborar raticidas y, para usos bélicos, en las granadas y en la producción de cortinas de humo.

Fosfuros de hidrógeno

Hay tres: el fosfuro gaseoso, PH_3, también llamado fosfamina; el fosfuro líquido, P_2H_4, y el fosfuro sólido, cuya fórmula no se conoce con exactitud. Hablaremos solamente del primero.

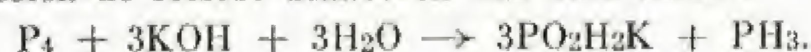
Propiedades. — Es incoloro, insoluble en el agua; no forma sales con los álcalis; en cambio, reacciona con los halógenos y arde en el aire, con llama clara, dando ácido fosfórico. Se combina con los hidrácidos halogenados, formando las sales de fosfonio (analogía con el amoniaco). Es un reductor muy enérgico, capaz de retirar todo el oxígeno al ácido sulfúrico.

Preparación. — 1º Se le prepara descomponiendo un fosfuro metálico, en frío, por el agua:



$$P_2Ca_3 + 6H_2O \longrightarrow 2PH_3 + 3Ca(OH)_2.$$

2º Por cocción de fósforo blanco en una base fuerte:



$$P_4 + 3KOH + 3H_2O \longrightarrow 3PO_2H_2K + PH_3.$$

El gas obtenido contiene vestigios de fosfuro de hidrógeno líquido, por lo que se inflama espontáneamente en el aire.

Aplicaciones. — Se le utiliza excepcionalmente como reductor en el laboratorio.

Compuestos oxigenados del fósforo

Indicamos en el cuadro siguiente los compuestos oxigenados del fósforo en sus diversas valencias

VALENCIA	ÓXIDOS	ÁCIDOS
I		PO_2H_3 (ác. hipofosforoso)
III	P_4O_6 (anhídrido fosforoso)	PO_3H_3 (ác. fosforoso)
IV		$P_2O_6H_4$ (ác. hipofosfórico)
V	P_2O_5 (anhídrido fosfórico)	PO_3H (ác. metafosfórico) $P_2O_7H_4$ (ác. pirofosfórico) PO_4H_3 (ác. ortofosfórico) $P_2O_8H_4$ (ác. peroxidifosfórico) PO_5H_3 (ác. peroximonofosfórico)

A los dos anhídridos corresponden los ácidos normales. Los demás ácidos son condensados.
Los compuestos más estables son los fosfóricos.

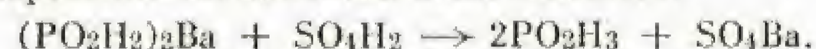
Ácido hipofosforoso (PO_2H_3)
Hipofosfitos

No se conoce el anhídrido correspondiente. Para obtener el ácido, se provoca la reacción del fósforo con el hidróxido de bario:



$$2P_4 + 3Ba(OH)_2 + 6H_2O \longrightarrow 3(PO_2H_2)_2Ba + 2PH_3;$$

se trata el hiposulfito formado con ácido sulfúrico:



$$(PO_2H_2)_2Ba + SO_4H_2 \longrightarrow 2PO_2H_3 + SO_4Ba.$$

Se separa el sulfato de bario por filtración y, por evaporación de la solución restante, se obtiene el ácido cristalizado, que funde a 17° C.

A pesar de contener tres átomos de hidrógeno, el ácido hipofosforoso es monobásico. Sus sales, los hipofosfitos, son solubles en el agua.

Anhídrido fosforoso (P_4O_6)

Se forma en la oxidación lenta del fósforo blanco, dando una masa blanca cristalina. Del estudio de su densidad se deduce que le corresponde la fórmula doble.

Ácido fosforoso (PO_3H_3)
Fosfitos

Preparación. — 1º Se le obtiene, junto a los ácidos fosfórico e hipofosfórico, en la oxidación lenta del fósforo en atmósfera húmeda.

2º La descomposición del tricloruro de fósforo por el agua produce ácido puro:



$$PCl_3 + 3H_2O \longrightarrow PO_3H_3 + 3ClH.$$

Propiedades. — 1º Es un sólido incoloro, cristalizado.

2º Los cristales se descomponen por el calor:



$$4PO_3H_3 \longrightarrow 3PO_4H_3 + PH_3.$$

3º Es menos oxigenado y más estable que el ácido fosfórico; es un reductor enérgico, que reduce las sales de oro, de plata y de mercurio al estado metálico.

4º Posee dos funciones "ácido" y da con la sosa los fosfitos monosódico PO_3H_2Na, y disódico PO_3HNa_2. Al calentar el fosfito monosódico, se deshidrata y da hipofosfato. Los fosfitos de los metales alcalinos y de calcio son solubles.

Anhídrido fosfórico (P_2O_5)

Se le prepara quemando fósforo en una corriente de aire seco. Los copos de anhídrido así formados se recogen en un frasco.

La nieve fosfórica es una mezcla de tres variedades, una cristalizada, otra amorfa, la tercera vítrea. Todas ellas se subliman y son solubles en el agua, en cuya acción se desprende calor. La solución obtenida contiene ácido metafosfórico, PO_3H, que se transforma poco a poco en ácido ortofosfórico.

Por esta razón, se emplea el anhídrido fosfórico para la desecación de los gases y en numerosas reacciones de deshidratación (v. p. 276).

Ácido ortofosfórico (PO_4H_3)
Fosfatos

Propiedades físicas. — El ácido fosfórico puro puede cristalizar, pero a menudo permanece en estado de sobrefusión. En el comercio se le expende en solución, que contiene diversos hidratos.

Propiedades químicas. — 1º Hacia 200° C, el ácido ortofosfórico se deshidrata parcialmente, dando ácido pirofosfórico:



$$2PO_4H_3 \longrightarrow P_2O_7H_4 + H_2O.$$

A su vez, éste se deshidrata al rojo obscuro y da ácido metafosfórico, PO_3H, volátil sin descomposición.

2º El ácido ortofosfórico posee tres funciones "ácido" y da, con la sosa, los fosfatos mono, di y trisódico: PO_4H_2Na, PO_4HNa_2, PO_4Na_3.

Las tres funciones ácido no poseen la misma fuerza: el fosfato monosódico es neutro frente a la heliantina, mientras que el fosfato disódico lo es frente a la ftaleína. Los ácidos muy débiles, como el ácido carbónico, liberan la tercera acidez. Por esta razón, los fosfatos alcalinos corrientes están constituidos por la sal disubstituida.

3º Los fosfatos disueltos dan, con el cloruro de bario, un precipitado blanco, y, con el nitrato de plata, un precipitado amarillo de fosfato de plata PO_4Ag_3. Como estos precipitados son solubles en los ácidos, precipitan solamente en solución neutra.

El reactivo más utilizado es la mixtura magnesiana (Cl_2Mg, $ClNH_4$, NH_3), que, con los fosfatos, da un precipitado de fórmula $PO_4MgNH_4 6H_2O$. Calcinándolo, este precipitado se transforma en pirofosfato $P_2O_7Mg_2$. Estas reacciones permiten el reconocimiento y la determinación cuantitativa del ácido fosfórico.

Industria. — 1º Se prepara industrialmente el *ácido fosfórico* tratando el fosfato natural o los huesos calcinados por una cantidad suficiente de ácido sulfúrico:



$$(PO_4)_2Ca_3 + 3SO_4H_2 \longrightarrow 3SO_4Ca + 2PO_4H_3.$$

Se le puede purificar transformándolo en fosfato monoamónico, $PO_4H_2NH_4$, que se deja cristalizar; a continuación, se le trata con agua regia.

2º Como el fosfato tricálcico natural es muy poco soluble, se le transforma en fosfato monocálcico soluble:



$$(PO_4)_2Ca_3 + 2SO_4H_2 \longrightarrow 2SO_4Ca + (PO_4H_2)_2Ca,$$

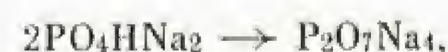
cuya mezcla con el sulfato cálcico, llamada *superfosfato*, asimilable por las plantas, es el principal abono fosfatado.

Reemplazando el ácido sulfúrico por el ácido fosfórico, se obtiene el *superfosfato doble*.

3º Gracias al empleo del procedimiento eléctrico (v. p. 277), se fabrica actualmente ácido fosfórico por acción del fósforo sobre el agua a 250° C. Tratando este ácido por el amoniaco sintético, se obtiene *fosfato amónico*, abono que contiene a la vez nitrógeno y fósforo asimilables por las plantas.

Ácido pirofosfórico ($P_2O_7H_4$)

Se obtiene el ácido pirofosfórico manteniendo el ácido ortofosfórico a 200° C. Se le puede preparar igualmente calcinando el fosfato disódico:



$$2PO_4HNa_2 \longrightarrow P_2O_7Na_4,$$

y tratando el pirofosfato obtenido por un ácido.

Se presenta en forma de una masa vítrea incolora, que funde fácilmente. Calentado al rojo, se deshidrata y da ácido metafosfórico.

Por otra parte, es capaz de fijar agua, transformándose así en ácido ortofosfórico, reacción que tiene lugar lentamente en frío, y rápidamente a la temperatura de ebullición.

Es un cuerpo cuatro veces ácido, cuyas sales, insolubles excepto las alcalinas, se disuelven en los ácidos. Los pirofosfatos dan respectivamente, con el cloruro de bario y el nitrato de plata, unos precipitados blancos de $P_2O_7Ba_2$ y $P_2O_7Ag_4$, solubles en medio ácido.
El reactivo magnesiano da un precipitado blanco de pirofosfato, $P_2O_7Mg_2$.

Ácido metafosfórico (PO_3H)

Se le obtiene tratando al rojo el ácido ortofosfórico, o calcinando el fosfato diamónico comercial:



$$PO_4H(NH_4)_2 \longrightarrow PO_3H + 2NH_3 + H_3O.$$

Forma una masa vidriosa amorfa, ávida de agua y delicuescente. No se descompone por el calor.
Al ponerse en contacto con el agua, se transforma en ácido ortofosfórico, lentamente en frío, rápidamente a la temperatura de ebullición, sin pasar por la fase intermedia de ácido pirofosfórico.
Es un monoácido fuerte. Los metafosfatos alcalinos son solubles en el agua; los demás, insolubles en medio neutro, se disuelven en las soluciones ácidas, excepto la sal de bario $(PO_3)_2Ba$, de color blanco.
El ácido metafosfórico es el único de todos los ácidos fosfóricos que da un precipitado con el cloruro de bario. Además, por ser un ácido fuerte, posee la propiedad característica de coagular la albúmina en frío.

Ácidos peroxifosfóricos ($P_2O_8H_4$, PO_5H_3) Peroxifosfatos

La electrólisis de los difosfatos permite obtener peroxidifosfatos (sales del ácido peroxidifosfórico $P_2O_8H_4$):



$$2PO_4HK_2 \longrightarrow P_2O_8K_4 + H_2,$$

que tratados por el agua dan lugar a sales del ácido peroximonofosfórico



$$P_2O_8K_4 + H_2O \longrightarrow PO_5HK_2 + PO_4HK_2.$$

Los ácidos peroxifosfóricos son muy inestables, y se descomponen fácilmente, dando oxígeno y el ácido fosfórico correspondiente, por lo que son buenos oxidantes.

Compuestos halogenados del fósforo

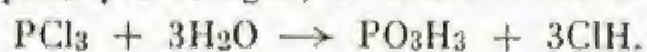
El fósforo obra como trivalente y pentavalente al combinarse con los halógenos; de estos compuestos, se conocen dos fluoruros gaseosos, PF_3 y PF_5; dos cloruros líquidos, P_2Cl_4 y PCl_3, y uno sólido, PCl_5; un bromuro líquido, PBr_3, y uno sólido, PBr_5; dos yoduros sólidos, P_2I_4 y PI_3. Además, forma con el oxígeno y el cloro el compuesto $POCl_3$. Vamos a describir los más importantes.

Tricloruro de fósforo (PCl_3). — Se prepara este cuerpo por combustión del fósforo blanco en corriente de cloro seco:



$$P_4 + 6Cl_2 \longrightarrow 4PCl_3.$$

El tricloruro así obtenido se purifica por destilación.
Se presenta en forma de un líquido incoloro, fumante al aire. En efecto, se descompone por el agua, de acuerdo con la reacción:



$$PCl_3 + 3H_2O \longrightarrow PO_3H_3 + 3ClH.$$

Pentacloruro de fósforo (PCl_5). — Se le obtiene haciendo pasar una corriente de cloro seco sobre el tricloruro:



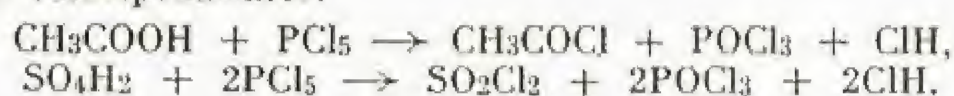
$$PCl_3 + Cl_2 \Longleftrightarrow PCl_5.$$

Es un sólido blanco amarillento, que se sublima a la presión atmosférica. La densidad de su vapor disminuye cuando aumenta la temperatura, y al mismo tiempo aparece una coloración verde, debida al cloro dejado en libertad.
Se descompone por el agua; cuando hay un exceso de ésta, se obtiene:



$$PCl_5 + 4H_2O \longrightarrow PO_4H_3 + 5ClH.$$

Reacciona con los ácidos y con los anhídridos, dando los cloruros de ácido correspondientes:



$$CH_3COOH + PCl_5 \longrightarrow CH_3COCl + POCl_3 + ClH,$$
$$SO_4H_2 + 2PCl_5 \longrightarrow SO_2Cl_2 + 2POCl_3 + 2ClH.$$

Oxicloruro de fósforo ($POCl_3$). — Se forma por la acción de la cantidad de agua teóricamente necesaria sobre el pentacloruro:



$$PCl_5 + H_2O \longrightarrow POCl_3 + 2ClH;$$

pero la manera más práctica de obtenerlo es por reacción del ácido oxálico sobre el pentacloruro:



$$PCl_5 + C_2O_4H_2 \longrightarrow POCl_3 + CO_2 + CO + 2ClH.$$

Es un líquido incoloro, fumante al aire, que se descompone por el agua, dando ácido ortofosfórico y ácido clorhídrico.

Arsénico (As = 74,91)

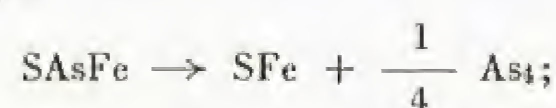
Reseña histórica. — Conocido por los alquimistas, que lo llamaban *veneno de los metales*, su nombre actual se deriva del griego (*arsenikos*, fuerte). **Marsh** imaginó, en 1836, el aparato destinado a reconocerlo en toxicología.

Propiedades físicas. — El arsénico es un sólido que se presenta en diversas variedades alotrópicas:
El *arsénico ordinario o metálico*, sólido gris de acero brillante, que se sublima hacia 400° C, insoluble, estable en frío;
El *arsénico amarillo*, obtenido por enfriamiento brusco del vapor a 0° C en la obscuridad, poco estable, soluble en el benceno y en el sulfuro de carbono;
El *arsénico amorfo*, negro, igualmente inestable, insoluble.
La densidad de vapor a 600° C corresponde a la molécula As_4, que se disocia a temperaturas más elevadas.

Propiedades químicas. — En su comportamiento químico, el arsénico presenta grandes analogías con el fósforo.
Arde dando anhídrido arsenioso, As_2O_3, y se oxida lentamente al aire; se inflama al ponerse en contacto con el cloro, formándose en la reacción tricloruro de arsénico, $AsCl_3$, líquido. No se conoce el pentacloruro.
Reduce los álcalis y el ácido nítrico.
Se combina con los metales dando arseniuros, que se descomponen por el agua liberando hidrógeno arseniado, AsH_3, análogo al PH_3.

Estado natural. — Es un elemento relativamente escaso en la naturaleza. Se encuentra principalmente en estado de sulfuros As_2S_2 (rejalgar) y As_2S_3 (oropimente) y como arseniuros y arseniosulfuros metálicos; existe también en las piritas.

Preparación. — No se le prepara industrialmente, pues sus aplicaciones son limitadas. Para obtenerlo, se calienta la pirita arsenical en ausencia de aire:



$$SAsFe \longrightarrow SFe + \frac{1}{4} As_4;$$

el arsénico, sublimado, se recoge en un recipiente previsto para tal fin.
Se le puede preparar también reduciendo el anhídrido arsenioso, As_2O_3, por el carbón.

Aplicaciones. — Se le utiliza para la fabricación de perdigones, mezclándolo con plomo. Se le añade a ciertas aleaciones de estaño y cobre para formar el metal de espejos.

Hidrógeno arseniado (AsH_3)

Propiedades. — El hidrógeno arseniado, llamado también *arsenamina*, es un gas incoloro, de olor a ajos, poco soluble en el agua. Es inestable a la temperatura ordinaria; por el calor, la descomposición es muy rápida, y el arsénico se deposita en forma de espejo negro, brillante, en las paredes de vidrio. Arde en el aire con llama pálida; es buen reductor y muy venenoso.

Preparación. — Se le obtiene tratando el arseniuro de cinc por el ácido clorhídrico:



$$As_2Zn_3 + 6ClH \longrightarrow 2AsH_3 + 3Cl_2Zn.$$

Aplicaciones. — Se provoca su formación en toxicología, para reconocer la existencia de compuestos de arsénico (véase más adelante).

Anhídrido arsenioso (As_2O_3)

Se conocen dos óxidos de arsénico, el anhídrido arsenioso, As_2O_3, y el anhídrido arsénico, As_2O_5, a los que corresponden el ácido arsenioso y el ácido arsénico. Al contrario de lo que sucede con el fósforo, los primeros son los más estables y los más importantes.

Propiedades físicas. — El anhídrido arsenioso es un sólido blanco, que se presenta en dos variedades cristalinas y una amorfa; es sublimable, poco soluble en el agua, soluble en el ácido clorhídrico. La densidad de vapor corresponde a la fórmula As_4O_6, disociable a temperatura elevada.

Propiedades químicas. — 1° El anhídrido arsenioso, que no se descompone por el calor, es reducido en caliente por el hidrógeno y el carbono, y libera entonces el arsénico.

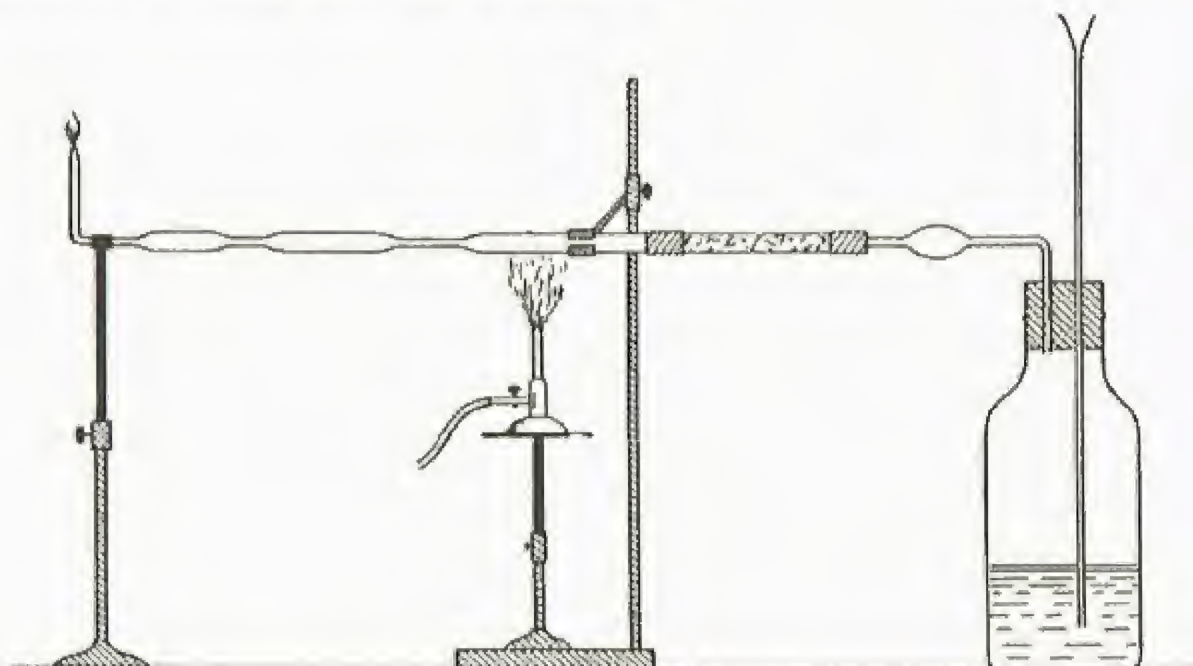


Fig. 24. — Aparato de Marsh para el reconocimiento de los compuestos del arsénico

2ª En solución, los oxidantes (hipoclorito, permanganato, cloruro de oro) lo transforman en ácido arsénico (v. p. 542):



$$As_2O_3 + 3H_2O + 2O \longrightarrow 2AsO_4H_3.$$

Propiedades fisiológicas y toxicológicas. — El anhídrido arsenioso (arsénico blanco) es un tóxico muy violento; es tanto más peligroso cuanto que es incoloro e inodoro. Como antídoto, se emplea la magnesia, que, ingerida, da un arsenito insoluble.

En los casos de envenenamiento, se le busca por medio del *aparato de Marsh* (*fig.* 24), en el que se produce hidrógeno puro por ataque del ácido sulfúrico puro sobre cinc puro (se inicia la reacción añadiendo unas cuantas gotas de cloruro de platino).

Se introducen a continuación las substancias sospechosas en el frasco. Si contienen anhídrido arsenioso, éste se transforma totalmente en hidrógeno arseniado por acción del hidrógeno naciente. Calentando a la llama el tubo de desprendimiento, este gas se descompone, formándose en el tubo un anillo negro, reluciente, de arsénico. Para la determinación cuantitativa, se pesa la cantidad de arsénico depositada.

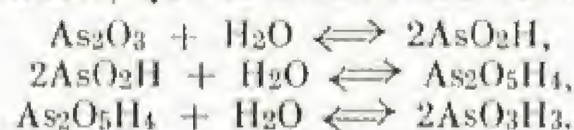
Debe distinguirse este depósito de arsénico de un depósito posible de antimonio, que no es tóxico, y cuyos óxidos dan lugar a reacciones análogas.

Preparación. — Se obtiene el anhidrido arsenioso tostando los arseniuros o los arseniosulfuros; el producto así formado se purifica por sublimación.

Aplicaciones. — Se le emplea como veneno contra los animales dañinos, y, en pequeñas dosis, en terapéutica. Añadido a las mezclas destinadas a la fabricación del vidrio, oxida las sales ferrosas, verdes, en sales férricas, amarillas.

Ácido arsenioso (AsO_3H_3) Arsenitos

Al disolverse el anhídrido arsenioso en el agua, la solución resultante tiene propiedades ácidas, por formarse los ácidos metarsenioso, piroarsenioso y ortoarsenioso, que se transforman unos en otros:



$$As_2O_3 + H_2O \Longleftrightarrow 2AsO_2H,$$
$$2AsO_2H + H_2O \Longleftrightarrow As_2O_5H_4,$$
$$As_2O_5H_4 + H_2O \Longleftrightarrow 2AsO_3H_3.$$

Es imposible obtenerlo en forma pura. Es un ácido débil, capaz de formar con los álcalis sales mono, di y tribásicas, los *arsenitos*.

De los arsenitos, son muy solubles en agua los alcalinos.

Anhídrido arsénico (As_2O_5)

El anhídrido arsénico se prepara por calentamiento del ácido arsénico; se presenta en forma de polvo blanco, que ya a la temperatura ordinaria capta el agua del aire para transformarse de nuevo en ácido arsénico.

Ácido arsénico (AsO_4H_3) Arseniatos

Se obtiene ácido arsénico oxidando el arsénico o el anhídrido arsenioso por el ácido nítrico en caliente.

Forma cristales prismáticos de gran tamaño. Se descompone por el calor, dando anhídrido arsénico, que, a su vez, se disocia en anhídrido arsenioso y oxígeno.

El ácido arsénico es un triácido, cuyas sales, los *arseniatos*, mono, di o trisubstituidos, son isomorfos de los fosfatos correspondientes, por lo que sus propiedades son muy parecidas.

Los reactivos de los arseniatos son los mismos que los de los fosfatos; el arseniato de plata, AsO_4Ag_3, es un precipitado de color rojo ladrillo.

Por deshidratación de estas sales, se obtienen piroarseniatos y metarseniatos, que, al ponerse en contacto con agua, regeneran los ortofosfatos.

Antimonio (Sb = 121,76)

Reseña histórica. — En la Antigüedad se conocía el antimonio en forma de sulfuro, al que se llamaba *stibium* (de donde se deriva su símbolo). La facilidad con la que este cuerpo se une con el oro hizo que se le atribuyesen propiedades nobles, por lo que también se le denominaba *régulo*. Sus propiedades fueron descritas por vez primera por **Basilio Valentín** en el siglo XV. Los alquimistas llegaron a utilizarlo de forma tan abusiva que la Facultad de Medicina de París lo prohibió en 1566.

Propiedades. — El antimonio es un sólido blanco con reflejos metálicos azulados, muy quebradizo; resiste a la acción del ácido clorhídrico y del sulfúrico; se combina en frío con los halógenos, y a temperatura más elevada con el oxígeno.

Al lado de la variedad hasta aquí descrita, existen otras tres; la más interesante es la llamada *antimonio explosivo*, que al chocar con un objeto metálico puntiagudo forma localmente la primera variedad de antimonio, transformación que va acompañada por una serie de detonaciones.

Preparación. — 1º Se obtiene por tostación de la estibina, S_3Sb_2, que se transforma en tetróxido:



$$S_3Sb_2 + 5O_3 \longrightarrow Sb_2O_4 + 3SO_2.$$

y se reduce luego éste con carbón:



$$Sb_2O_4 + 4C \longrightarrow 2Sb + 4CO.$$

Aplicaciones. — Se emplea principalmente para preparar aleaciones, por la propiedad que tiene de comunicar a éstas brillo y dureza. Sirve también en pirotecnia, y, sus compuestos, en terapéutica.

Hidrógeno antimoniado (SbH_3)

Propiedades. — Llamado también *estibamina*, es un gas incoloro, maloliente, algo soluble en el agua. Presenta grandes analogías con la arsenamina, y, como ésta, deposita el elemento en la parte fría del tubo en que tiene lugar su descomposición por el calor. Es venenoso.

Se le obtiene tratando con clorhídrico el antimoniuro de magnesio:



$$Sb_2Mg_3 + 6ClH \longrightarrow 2SbH_3 + 3Cl_2Mg.$$

Aplicaciones. — Sirve para la investigación de los compuestos de antimonio; se reducen éstos a estibamina, que luego se descompone en antimonio e hidrógeno.

Anhídrido antimonioso (Sb_2O_3)

Se forma en la combustión del antimonio al aire. Es un polvo blanco, que por el calor tiende al amarillo; es insoluble en el agua, y soluble en los álcalis.

Se le utiliza en poca escala para fabricar barnices y pinturas.

Ácido antimonioso (SbO_3H_3)

Se le obtiene por reacción del tartrato de antimonilo sobre el ácido sulfúrico diluido; es anfótero, es decir, que reacciona con los ácidos, dando sales de antimonio, y con las bases, formando antimonitos.

Anhídrido antimónico (Sb_2O_5)

Se le prepara tratando antimonio por ácido sulfúrico concentrado; es un polvo amarillo claro que se disuelve poco a poco en el agua.

Ácido antimónico (SbO_4H_3) Antimoniatos

La solución acuosa del anhídrido antimónico presenta reacción ácida; sin embargo, no se ha conseguido hasta la fecha aislar el ácido antimónico; en cambio, se conocen las sales de los ácidos metantimónico, SbO_3H, piroantimónico, $Sb_2O_7H_4$, y ortoantimónico, SbO_4H_3.

En general, los antimoniatos son poco solubles en el agua y se hidrolizan fácilmente.

Encuentran pocas aplicaciones. Se emplea el metantimoniato sódico como medio de enturbiamiento en los vidrios, y el piroantimoniato ácido de potasio como reactivo del sodio.

Metaloides tetravalentes

Carbono: Estado natural, preparación y alotropía. Otras propiedades físicas. Propiedades químicas. Masa atómica. *Óxido de carbono:* Reseña histórica. Propiedades físicas y fisiológicas. Propiedades químicas. Preparación industrial. Preparación en el laboratorio. *Anhídrido carbónico. Carbonatos:* Reseña histórica. Propiedades físicas. Propiedades químicas. Estado natural. Preparación industrial. Preparación en el laboratorio. Aplicaciones. *Sulfuro de carbono:* Propiedades físicas. Propiedades químicas. Preparación y aplicaciones. — **Silicio:** Reseña histórica. Propiedades físicas. Propiedades químicas. Estado natural y preparación. Preparación industrial. *Sílice. Silicatos:* Estado natural. Alotropía. Propiedades físicas. Propiedades químicas. Reconocimiento. *Fluoruro de silicio. Ácido hidrofluosilícico.* — **Metaloide del grupo del boro:** *Boro:* Reseña histórica. Propiedades. Estado natural. Preparación. *Anhídrido bórico. Ácido bórico. Boratos:* Reseña histórica. Propiedades físicas. Propiedades químicas. Estado natural y preparación. Aplicaciones

Los metaloides tetravalentes son dos: el *carbono* y el *silicio*.

Dan lugar a combinaciones hidrogenadas análogas CH_4 y SiH_4, y se combinan con el oxígeno, desprendiendo gran cantidad de calor. El número de compuestos de carbono es tan inmenso, que en su mayor parte

constituye un capítulo especial de la química, la *química orgánica*. En cuanto al silicio, ofrece un carácter más metálico; sus compuestos son mucho menos numerosos.

Carbono (12,011)

El carbono constituye la parte principal de los *carbones;* sus aspectos físicos son muy diferentes, por lo que no puede ser definido sino por sus propiedades químicas: 12 gramos de carbono puro arden en un exceso de oxígeno, dando 44 gramos de anhídrido carbónico.

Estado natural, preparación y alotropía. — Existen dos variedades cristalizadas de carbono, y diversas amorfas.

1º El *diamante*, cuerpo incoloro, muy duro, de densidad 3,5, cristalizado en el sistema regular, se encuentra en los terrenos de aluviones, principalmente en el Brasil y en el cabo de Buena Esperanza. Es una variedad de carbono casi puro. Tallado, se le emplea en joyería; sirve igualmente para cortar el vidrio y para perforar las rocas duras. Se han realizado diversas tentativas para prepararlo artificialmente, por cristalización del carbono disuelto en hierro fundido, a presión muy elevada. Los diamantes así obtenidos son de tamaño pequeño.

2º El *grafito* o *plombagina*, gris negro, de densidad 2,2, es friable y deja una marca sobre el papel; se presenta cristalizado en láminas brillantes hexagonales; se le encuentra en Siberia, Ceilán y Madagascar; se le obtiene artificialmente calentando el coque a temperatura elevada y moldeando luego a presión. Está constituido por carbono bastante puro.

Se le emplea para la confección de crisoles refractarios, y en galvanoplastia; sirve igualmente para la fabricación de lápices y, añadido a las grasas, como lubricante.

3º El *carbono amorfo* es el constituyente esencial de numerosos carbones naturales o artificiales.

Entre los carbones naturales citaremos la *antracita*, la *hulla*, el *lignito* y la *turba*. Se han originado todos ellos por putrefacción de vegetales en ausencia de aire.

La antracita es negra y tiene brillo metálico. Es el carbón más antiguo y el más rico en carbono; se la emplea como combustible y como reductor en los altos hornos. Existe en abundancia en Estados Unidos, Chile, Francia e Inglaterra.

La hulla es igualmente negra; contiene menos carbono que la antracita y se le emplea mucho como combustible; además, por destilación seca de la hulla se obtienen numerosos cuerpos de importancia industrial considerable (amoníaco, coque, productos de base para la preparación de colorantes, etc.). Los principales países productores son China, Estados Unidos e Inglaterra.

El lignito se presenta formando masas negras o de color pardo; contiene menos carbono que las dos variedades anteriores, por lo que tiene menos poder calorífico que éstas; se le utiliza como combustible; por destilación seca da diversos productos volátiles aprovechables.

La turba está constituida por restos de plantas inferiores cuya carbonización no es completa, por lo que es la que contiene menos carbono de los cuatro carbones naturales y su utilización como combustible ofrece menos interés. Forma masas esponjosas, pardas o negras.

De los carbones artificiales, merecen citarse el *coque*, el *carbón de retorta*, el *carbón vegetal*, el *negro de humo* y los *carbones activos*.

El coque se obtiene como residuo de la calcinación de la hulla en recipientes cerrados; es un carbón muy poroso, gris, brillante, de aspecto metálico. Tiene un poder calorífico equiparable al de la hulla.

El carbón de retorta es duro y pesado. Se le utiliza para fabricar electrodos. Se le obtiene como residuo en la preparación del gas de alumbrado.

El carbón vegetal se forma por combustión incompleta de la madera; es negro, ligero, y tiene un poder calorífico considerable. Se le utiliza como combustible.

El negro de humo es pulverulento; se forma por combustión parcial de diferentes cuerpos orgánicos. Tiene varias aplicaciones; así, incorporado al caucho, aumenta su resistencia al desgaste en las cubiertas de los neumáticos; sirve también de base para la elaboración de la tinta china.

Los carbones activos se obtienen a partir del serrín de madera tratado a 700º C por el vapor de agua. Manifiesta propiedades adsorbentes particularmente activas, por lo que tiene numerosas aplicaciones: obtención de grandes vacíos, máscaras contra los gases deletéreos, recuperación de los vapores de diferentes disolventes, decoloración de cuerpos coloreados por impurezas (refinado del azúcar), etc.

Se puede obtener en el laboratorio un carbono amorfo bastante puro, deshidratando el azúcar por el calor.

Otras propiedades físicas. — Todas las variedades de carbono son sólidas; no se les puede fundir; en el arco eléctrico (3 500º C), se subliman. El carbono se disuelve solamente en ciertos metales fundidos, sobre todo en el hierro. El carbono amorfo, especialmente el carbón vegetal, es capaz de adsorber grandes cantidades de gases.

Propiedades químicas. — En caliente, el carbono da lugar a reacciones químicas muy variadas, en las que puede desempeñar los dos papeles opuestos de elemento electronegativo o electropositivo. Esta propiedad le confiere la facultad de unirse a la mayor parte de los demás cuerpos simples.

1º Se combina con el *hidrógeno*, para dar, a 1 200º C, el gas metano CH_4, y, en el arco eléctrico, acetileno C_2H_2 (síntesis de Berthelot). Estas reacciones constituyen la base de las síntesis de los carburantes por el procedimiento Bergius: el carbono, en suspensión en aceite, se combina con el hidrógeno a presión, utilizando un catalizador adecuado.

2º Se une con la mayor parte de los *metales;* el hierro colado contiene diversos carburos, especialmente cementita, CFe_3. Los carburos de aluminio C_3Al_4, y de calcio, C_2Ca, se descomponen por el agua y dan respectivamente metano y acetileno.

3º El flúor es el único *halógeno* que reacciona con el carbono; ataca el carbono amorfo en frío, el grafito al rojo obscuro y el diamante al rojo vivo.

4º El carbono arde en el *oxígeno* y en el aire, dando anhídrido carbónico, CO_2. A temperatura elevada, o en presencia de un exceso de carbono, se obtiene el óxido de carbono CO.

5º Por consiguiente, el carbono es un *reductor*, particularmente activo e importante. Reduce el vapor de agua al rojo, dando gas de agua (v. p. 282), y numerosos óxidos metálicos, liberando el metal (metalurgias); en este caso, si la temperatura es bastante elevada, se puede obtener un carburo; así, por acción del coque sobre la cal en el horno eléctrico, se obtiene el carburo cálcico. Igualmente, reduce todas las combinaciones oxigenadas de los metaloides; con la sílice y el anhídrido bórico, da, en el horno eléctrico, los carburos CSi (carborundo, empleado como abrasivo) y CB_6. Reduce también las sales oxigenadas (sulfatos, nitratos, carbonatos).

6º Se combina con el azufre al rojo (preparación del sulfuro de carbono), y con el nitrógeno en presencia de ciertas bases (preparación de los cianuros [v. p. 272]).

7º El carbono es un elemento de importancia fundamental para los seres vivos. Las plantas asimilan el anhídrido carbónico del aire y lo transforman en hidratos de carbono y almidón. Las plantas sirven para la alimentación del hombre y de los animales, que, para sus necesidades vitales, queman estos compuestos y devuelven a la atmósfera el carbono en forma de anhídrido carbónico; esta serie de procesos constituye el ciclo del carbono en la naturaleza.

Masa atómica. — Ha sido determinada por el estudio de la síntesis del anhídrido carbónico (Dumas y Stas) por combustión del diamante, y vale 12,011.

Óxido de carbono (CO)

Reseña histórica. — Este gas fue observado por **Lassonne** en 1776, y estudiado por **Priestley** en 1796.

Propiedades físicas y fisiológicas. — Es un gas incoloro e inodoro, poco soluble y difícil de licuar.

Es muy tóxico, pues se combina con la hemoglobina de la sangre, impidiéndole fijar el oxígeno. Es el causante de numerosas asfixias, pues se desprende en las estufas de combustión lenta y es uno de los componentes del gas de alumbrado. Es tanto más peligroso cuanto que, inodoro, pasa inadvertido.

Propiedades químicas. — 1º El óxido de carbono es estable; sin embargo, se puede disociar, pero a causa de una reacción secundaria, la transformación es exotérmica y se formula:



$$2CO \rightleftarrows CO_2 + C.$$

Por lo tanto, su estabilidad aumena con la temperatura; el hecho de que pueda subsistir en frío se debe únicamente a las resistencias pasivas.

2º Por consiguiente, se le reduce con gran dificultad; entre los metaloides, el boro es el único capaz de liberar el carbono del CO. En presencia de níquel reducido, se puede realizar la síntesis del metano por medio de hidrógeno:



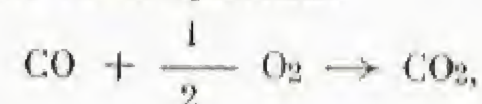
$$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O.$$

Esta síntesis, debida a Sabatier, constituye el proceso fundamental de la fabricación de carburantes sintéticos por el procedimiento Fischer-Tropsch: el gas de agua, enriquecido con hidrógeno, se envía hacia 200º C a la presión atmosférica sobre un catalizador a base de cobalto; se obtienen así bencinas ligeras y parafinas sólidas, que sirven para la preparación de grasas y de jabones sintéticos.

3º Puesto que el carbono es tetravalente y el oxígeno bivalente, el CO es un radical no saturado que presenta dos valencias libres. A la luz, puede fijar dos átomos de cloro y dar el cloruro de carbonilo, $COCl_2$, o *fosgeno*, gas muy deletéreo, utilizado en la guerra química (En general, se le obtiene por acción del oleum sobre el tetracloruro de carbono.)

Se puede combinar también con los vapores de azufre y dar el oxisulfuro de carbono, o sulfuro de carbonilo, COS.

4º El óxido de carbono fija sobre todo *oxígeno*. En el aire, arde dando anhídrido carbónico. Esta combustión, realizada en el eudiómetro, ha permitido establecer su composición:



$$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2,$$

y explica los empleos industriales del gas pobre y del gas de agua en los hornos y en los motores.

5º Por lo tanto, el óxido de carbono es *reductor*. Reduce el vapor de agua al rojo, propiedad que se utiliza para la preparación industrial del hidrógeno (v. p. 259). Reduce la mayor parte de los óxidos metálicos; se saca provecho de esta propiedad en la obtención del hierro en los altos hornos.

En fin, reduce, en frío o a menos de 100º C, el permanganato potásico, el cloruro de oro y el ácido yódico:



$$2IO_3H + 5CO \rightarrow 5CO_2 + I_2 + H_2O.$$

Esta última reacción sirve para el reconocimiento y la determinación cuantitativa del óxido de carbono.

6° Se fija en ciertos metales y da así compuestos de adición, como el níquel-tetracarbonilo $Ni(CO)_4$, que se forma en la metalurgia del níquel.

7° El óxido de carbono, a presión, se fija en la sosa; se utiliza este procedimiento en la síntesis industrial de los formiatos:



$$CO + NaOH \longrightarrow HCOONa.$$

8° El cloruro cuproso, ClCu, lo absorbe en solución clorhídrica. El compuesto obtenido se disocia por el calor y deja en libertad el óxido de carbono captado primitivamente.

Preparación industrial. — Se prepara en la industria para transformar el combustible sólido en combustible gaseoso, cuyo empleo es más cómodo y más económico (recuperador), siendo además apto en los motores de explosión.

Para obtener el *gas pobre*, mezcla de óxido de carbono, nitrógeno en abundancia y un poco de anhídrido carbónico, se emplea un gasógeno, en el que se hace pasar una corriente de aire a través de una capa espesa de coque inflamado; el poder calorífico de este gas es relativamente pequeño.

El *gas de agua*, producido al pasar una corriente de vapor de agua sobre coque incandescente, es una mezcla muy combustible, puesto que contiene sobre todo óxido de carbono e hidrógeno:



$$C + H_2O \longrightarrow CO + H_2.$$

Como la reacción de fabricación del gas de agua es endotérmica, es preciso calentar el carbono; generalmente, se logra este resultado enviando alternativamente vapor de agua y aire, lo que produce un *gas mixto*. (V. COMBUSTIBLES, p. 344.)

Cuando se quiere retirar el óxido de carbono de una de estas mezclas, se procede por licuefacción fraccionada.

Preparación en el laboratorio. — 1° Se descompone por el calor el ácido fórmico, en presencia de ácido sulfúrico:



$$HCOOH \longrightarrow H_2O + CO.$$

2° Se le obtiene también por descomposición en caliente del oxalato sódico:



$$COONa \cdot COONa \longrightarrow CO_3Na_2 + CO.$$

Anhídrido carbónico (CO_2). Carbonatos

Reseña histórica. — Es el *espíritu silvestre* de los alquimistas.

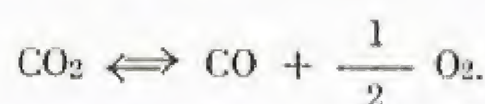
A principios del siglo XVII, **Van Helmont** estudió este fluido, al que llamó gas (del holandés *ghoast*, espíritu). **Priestley** lo denominó "aire fijo", por haber observado que se fijaba en los álcalis. **Lavoisier** lo identificó y le dio el nombre que lleva actualmente. Su composición fue determinada por **Dumas** y **Stas**.

Propiedades físicas. — Es un gas incoloro, más pesado que el aire, de sabor picante.

A la temperatura normal, se disuelve en el agua a igualdad de volúmenes; la solución obtenida a presión constituye el agua de Seltz artificial.

El anhídrido carbónico se licúa fácilmente a presión; se solidifica también con relativa facilidad; la "nieve carbónica" se sublima a — 79° C a la presión atmosférica. Se la emplea para producir temperaturas bajas.

Propiedades químicas. — 1° El anhídrido carbónico es una combinación estable, que incluso por encima de 1 000° C se disocia muy poco:



$$CO_2 \Longleftrightarrow CO + \frac{1}{2} O_2.$$

2° La existencia de esta disociación explica el que pueda ser reducido al rojo por los cuerpos combustibles, formándose óxido de carbono en la reacción; el hidrógeno, el carbono, el fósforo, el hierro..., dan lugar a estas reacciones de equilibrio:



$$CO_2 + H_2 \Longleftrightarrow CO + H_2O.$$

Sin embargo, no mantiene las combustiones ordinarias.

3° Los reductores muy enérgicos, como el boro, el potasio y el magnesio, lo reducen al rojo al estado de carbono libre.

4° Su solución tiene las propiedades del ácido carbónico, CO_3H_2, que no existe en libertad. Da con las bases dos series de sales, los carbonatos neutros, como el CO_3Na_2, y los carbonatos ácidos o bicarbonatos, como el CO_3HNa. Tiñe de rojo el papel de tornasol.

5° Haciendo pasar una corriente de anhídrido carbónico por una solución acuosa de cal, precipita el carbonato cálcico:



$$CO_2 + Ca(OH)_2 \longrightarrow CO_3Ca + H_2O;$$

esta reacción sirve para reconocer la presencia del anhídrido carbónico.

La solución se vuelve de nuevo límpida por un exceso de anhídrido carbónico, porque se forma bicarbonato cálcico soluble:



$$CO_2 + H_2O + CO_3Ca \Longleftrightarrow (CO_3H)_2Ca.$$

6° Los carbonatos neutros no alcalinos son insolubles. Excepto los alcalinos, todos los demás carbonatos se descomponen por el calor, produciendo anhídrido carbónico.

El carbono reduce todos los carbonatos, dejando en libertad el óxido o el metal correspondientes:



$$CO_3Na_2 + 2C \longrightarrow 2Na + 3CO.$$

Estado natural. — Existe en la atmósfera, procedente de las combustiones, de la respiración y de las fermentaciones. Por otra parte, gracias a la energía solar, la clorofila de las plantas lo destruye; el oxígeno atmosférico debe su origen a esta descomposición.

La proporción de anhídrido carbónico en la atmósfera permanece prácticamente constante, gracias al papel regulador que ejercen las aguas del suelo: éstas lo pueden fijar, al mismo tiempo que el carbonato cálcico, en forma de bicarbonato soluble, o lo pueden abandonar, según que la presión del gas en la atmósfera aumente o disminuya.

El anhídrido carbónico se encuentra combinado en forma de carbonatos, sobre todo de calcio (calizas).

Preparación industrial. — 1° La combustión de coque da una mezcla gaseosa que contiene este gas. Se le extrae haciéndole reaccionar con una solución de carbonato neutro de sodio, que se transforma en carbonato ácido:



$$CO_2 + H_2O + CO_3Na_2 \Longleftrightarrow 2CO_3HNa.$$

Éste se descompone por el calor, de acuerdo con la reacción inversa. El anhídrido carbónico obtenido se licúa por compresión y se almacena en tubos de acero.

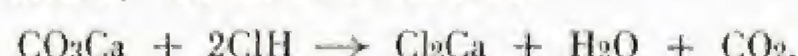
2° Se le obtiene también por calcinación de los carbonatos, generalmente a partir de la caliza:



$$CO_3Ca \longrightarrow CaO + CO_2.$$

3° Se desprende de las substancias sometidas a la fermentación alcohólica, especialmente en la elaboración de la cerveza.

Preparación en el laboratorio. — Se ataca el carbonato cálcico (mármol blanco) con un ácido diluido:



$$CO_3Ca + 2ClH \longrightarrow Cl_2Ca + H_2O + CO_2.$$

Aplicaciones. — Se le emplea para la preparación del carbonato sódico y de la cerusa o albayalde. En estado líquido sirve para la fabricación de las aguas gaseosas y para la manipulación de la cerveza a presión. En fin, en forma de nieve carbónica, se le utiliza en la industria frigorífica. (V. LA PRODUCCIÓN ARTIFICIAL DEL FRÍO, p. 186.)

Sulfuro de carbono (CS_2)

Propiedades físicas. — Es un líquido incoloro, de olor fétido, muy volátil, que tiene un índice de refracción muy elevado y un gran poder dispersivo.

Es muy buen disolvente: disuelve el yodo, el azufre, el fósforo, los cuerpos grasos, el caucho..., por lo que se le emplea para desengrasar la lana, extraer los aceites vegetales y vulcanizar el caucho.

Propiedades químicas. — 1° Se *descompone* fácilmente por el calor en carbono y azufre; por lo tanto, en caliente, tiene las mismas propiedades que sus componentes.

2° Es muy *inflamable*, y sus vapores forman una mezcla detonante con el aire:



$$CS_2 + 3O_2 \longrightarrow CO_2 + 2SO_2.$$

El cloro, al rojo, lo transforma en cloruros:



$$CS_2 + 3Cl_2 \longrightarrow CCl_4 + S_2Cl_2.$$

3° Se asemeja al gas carbónico por su acción sobre los sulfuros metálicos, con los que da en caliente *tiocarbonatos*:



$$CS_2 + SK_2 \longrightarrow CS_3K_2,$$

sales de un ácido débil e inestable, el ácido tiocarbónico, CS_3H_2.

Preparación y aplicaciones. — Se le prepara por acción del vapor de azufre sobre el carbono a temperatura elevada; los vapores obtenidos se condensan y luego se purifican por destilación.

Además de los usos antes citados, se le emplea como insecticida y como disolvente de la viscosa.

Silicio (Si = 28,09)

Reseña histórica. — El silicio fue descubierto por **Berzelius** en 1822. **Saint-Claire Deville** lo obtuvo en estado cristalizado en 1854 y estableció las analogías que presenta con el carbono.

Su nombre procede de la denominación latina *silex*, piedra silícea.

Propiedades físicas. — Se presenta bajo dos aspectos: *amorfo* y *cristalizado*.

El silicio amorfo es un polvo marrón que tizna los dedos.

El silicio cristalizado forma agujas grises de brillo metálico; es más duro que el vidrio, al que raya. Funde hacia 1 500° C, y se volatiliza en el horno eléctrico.

Propiedades químicas. — Es tetravalente, como el carbono, al que se asemeja por sus reacciones químicas; su afinidad por el oxígeno es aún mayor que la de éste.

1° Se combina con los cuatro *halógenos*.

2° Arde en el *oxígeno* con desprendimiento de calor considerable; sin embargo, la sílice que se forma en la reacción es impermeable y hace que la combustión resulte difícil.

3° Es un *reductor* enérgico; reacciona en caliente con las bases, formando silicatos y desprendiendo hidrógeno.

4° Como el carbono, se combina al rojo vivo con el *hidrógeno*, para dar siliciometano o monosilano, SiH_4, y con varios metales, producien-

do los siliciuros correspondientes. Se une también con el carbono, dando carborundo CSi (v. p. 281).

Estado natural y preparación. — El silicio es uno de los elementos más abundantes de la corteza terrestre, en la que existe en forma de sílice, SiO_2, y de silicatos, especialmente de sodio, potasio, magnesio, calcio, aluminio y hierro (feldespatos, micas, serpentina, arcillas). En cambio, no existe en estado libre.

En el laboratorio, se puede preparar *silicio puro* reduciendo la sílice por el magnesio al rojo:



$$SiO_2 + 2Mg \longrightarrow 2MgO + Si.$$

Preparación industrial. — Se le obtiene en el horno eléctrico, por reducción de la sílice con carbón:



$$SiO_2 + 2C \longrightarrow Si + 2CO.$$

La presencia de hierro favorece esta operación, por lo que se fabrica industrialmente el *ferrosilicio* (aleación de hierro y silicio) tratando una mezcla de sílice, óxido de hierro y coque en el horno eléctrico. En esta aleación, la riqueza del silicio puede llegar a ser de 98%.

Sílice (SiO_2). Silicatos

Estado natural. Alotropía. Propiedades físicas. — La sílice se presenta bajo diferentes aspectos cristalizados:

El *cuarzo* o *cristal de roca*, en forma de prismas hexagonales terminados por pirámides, es incoloro cuando es puro; en muchos casos (cuarzo ahumado, amatista...) está coloreado por las impurezas que lo acompañan.

La *tridimita* y la *cristobalita*, estables a temperatura más elevada, pertenecen a otros sistemas cristalinos.

Las variedades: ónice, ágata, ópalo, sílex o pedernal, piedra silícea y arena silícea están constituidas por sílice más o menos pura.

La *sílice amorfa* se obtiene en forma de precipitado gelatinoso cuando se trata por un ácido un silicato disuelto.

Al deshidratar los geles de sílice, se obtiene un polvo blanco amorfo.

La sílice funde hacia 1 800° C, y al enfriarse forma un sólido vidrioso análogo al vidrio. El cuarzo fundido ofrece ciertas ventajas sobre el vidrio; se dilata menos, es menos fusible y es más resistente que el vidrio; además, es transparente a los rayos ultravioleta.

Propiedades químicas. — 1° La sílice es un cuerpo muy estable, no disociable; solamente la reducen el carbono, el boro y unos pocos metales; al ser reducida por el carbono en el horno eléctrico, da *carborundo*, CSi (v. p. 281). La mezcla de sílice y carbón puede dar en caliente silicio naciente; éste puede combinarse con el cloro y con el azufre y sirve para preparar los compuestos $SiCl_4$ y SiS_2.

2° El *ácido fluorhídrico* ataca la sílice y los *silicatos* (v. p. 260).

3° A temperatura elevada, la sílice se combina con las *bases* y con los óxidos metálicos para dar sales, los silicatos; por consiguiente, se conduce como un *anhídrido de ácido*. Reacciona con la mayor parte de las sales, de las que desplaza los anhídridos correspondientes; a este tipo de reacción pertenece la fabricación del *vidrio* ordinario, silicato doble de sodio y de calcio, que se obtiene fundiendo arena silícea, carbonato sódico y carbonato cálcico.

Todos los silicatos son insolubles, excepto los alcalinos; en general, tienen fórmulas muy complicadas.

Reconocimiento. — Los silicatos disueltos dan un precipitado de sílice gelatinosa al tratarlos con ácido clorhídrico diluido. Los silicatos sólidos provocan, con un fluoruro y ácido sulfúrico, un desprendimiento de fluoruro de silicio, SiF_4. Este gas da el mismo precipitado al ponerse en contacto con el agua.

Fluoruro de silicio (SiF_4)

Se le obtiene en la acción del ácido fluorhídrico sobre la arena. Es un gas incoloro, de olor picante, fumante en atmósfera húmeda; es muy ávido por el agua, con la que reacciona para dar ácido hidrofluosilícico.

Ácido hidrofluosilícico (SiF_6H_2)

Se le prepara generalmente por acción del ácido fluorhídrico sobre la sílice; es gaseoso a la temperatura ordinaria, y se disuelve bien en el agua; la solución tiñe de rojo el papel de tornasol. Al calentarlo, se disocia en ácido fluorhídrico y tetrafluoruro de silicio. Se le emplea como desinfectante.

Metaloide del grupo del boro

Boro ($B = 10,82$)

Reseña histórica. — El boro fue aislado casi al mismo tiempo en Francia por **Gay-Lussac** y **Thenard,** y en Inglaterra por **Davy.**

Propiedades. — 1° El boro se presenta bajo el aspecto de un polvo marrón, que funde hacia 2 400° C; al solidificarse, forma una masa sólida negra muy dura. No se conoce cuerpo alguno capaz de disolverlo.

2° Desde el punto de vista químico, el boro es un metaloide trivalente, que no puede ser incluido en el grupo del nitrógeno. Sus propiedades lo emparentan más bien con el silicio o con metales como el aluminio; en el sistema periódico, se encuentra en la misma columna que éste.

3° El boro se combina, a temperatura adecuada, con todos los halógenos, dando compuestos del tipo BCl_3.

4° Arde con llama verde y gran desprendimiento de calor, formándose en la combustión anhídrido bórico, B_2O_3.

5° De todos los metaloides, es el que presenta el carácter reductor más enérgico; descompone todos los anhídridos, así como numerosos óxidos metálicos.

6° En fin, se combina en caliente con el azufre, y a temperatura elevada con el nitrógeno y el carbono, dando los compuestos B_2S_3, BN, CB_6. Se une también a numerosos metales, con los que forma los boruros correspondientes. Sus compuestos hidrogenados, los boranos, sirven como combustibles en los cohetes.

Estado natural. — El boro se encuentra bajo forma de anhídrido bórico B_2O_3, combinado con el agua o con las bases; el ácido bórico existe en las fumarolas de Toscana; los boratos de sodio (bórax), de calcio y de magnesio forman yacimientos en el Tíbet y en Asia Menor.

Preparación. — Se le prepara en el horno eléctrico, reduciendo el cloruro de boro por el hidrógeno.

Se le obtiene igualmente reduciendo el anhídrido bórico con magnesio:



$$B_2O_3 + 3Mg \longrightarrow 2B + 3MgO.$$

Anhídrido bórico. Ácido bórico (BO_3H_3) Boratos

Reseña histórica. — El ácido bórico fue observado por primera vez, en 1702, por **Guillermo Homberg. Claschi** y **Larderel** lo explotaron más tarde en las lagunas de Toscana, llamadas *soffioni*.

Propiedades físicas. — El ácido bórico forma agujas cristalinas; es soluble en el agua, sobre todo caliente. El anhídrido ofrece el aspecto de una masa vidriosa transparente.

Propiedades químicas. — 1° El anhídrido bórico es muy estable; solamente es reducido por unos pocos metales, como el sodio y el potasio. El carbón lo reduce en presencia de un cuerpo (cloro, azufre) capaz de combinarse con el boro.

2° El ácido fluorhídrico reacciona con el anhídrido bórico dando fluoruro de boro:



$$B_2O_3 + 6FH \longrightarrow 2BF_3 + 3H_2O.$$

3° El ácido bórico BO_3H_3, llamado *ortobórico*, se deshidrata progresivamente por el calor. Se obtiene sucesivamente ácido *metabórico* BO_2H, *tetrabórico* $B_4O_7H_2$ y, por último, al rojo, anhídrido bórico B_2O_3.

4° La solución acuosa ofrece las propiedades de un ácido débil; no da reacción con la heliantina. Dicha solución no contiene ácido ortobórico, sino, según la concentración, ácido metabórico o ácido tetrabórico. Así se explica su acción sobre las bases: con la sosa se obtiene el metaborato BO_2Na, o el bórax $B_4O_7Na_2$.

5° El anhídrido bórico disuelve los óxidos metálicos. Las sales producidas forman perlas, cuya coloración permite reconocer el metal que constituye el catión.

6° El ácido bórico forma ésteres con los alcoholes. Con el alcohol etílico, se obtiene el éster ortobórico ($B(OC_2H_5)_3$), que arde con llama verde, lo que facilita un medio de investigación de los compuestos del boro. Con la glicerina, da un ácido fuerte, el ácido glicerobórico; se utiliza esta reacción para la determinación cuantitativa del ácido bórico.

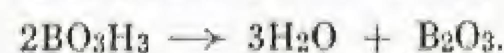
7° El agua oxigenada concentrada transforma el borato sódico en perborato (v. p. 267); éste regenera el agua oxigenada al ponerse en contacto con agua, por lo que se le emplea en la fabricación de productos para el blanqueo de la ropa blanca.

Estado natural y preparación. — 1° El vapor de agua que se desprende por las grietas del suelo, en Toscana, contiene ácido bórico, que se condensa en agua fría; evaporando la solución, cristaliza el ácido bórico, BO_3H_3.

Se le purifica transformándolo en bórax, $B_4O_7Na_2$, que se hace cristalizar.

2° El borato cálcico, que se encuentra formando yacimientos en Asia Menor, sirve también como materia prima para obtenerlo; para ello, se le transforma primeramente en bórax, y luego en ácido bórico.

3° El ácido bórico se deshidrata por el calor, y da anhídrido bórico:

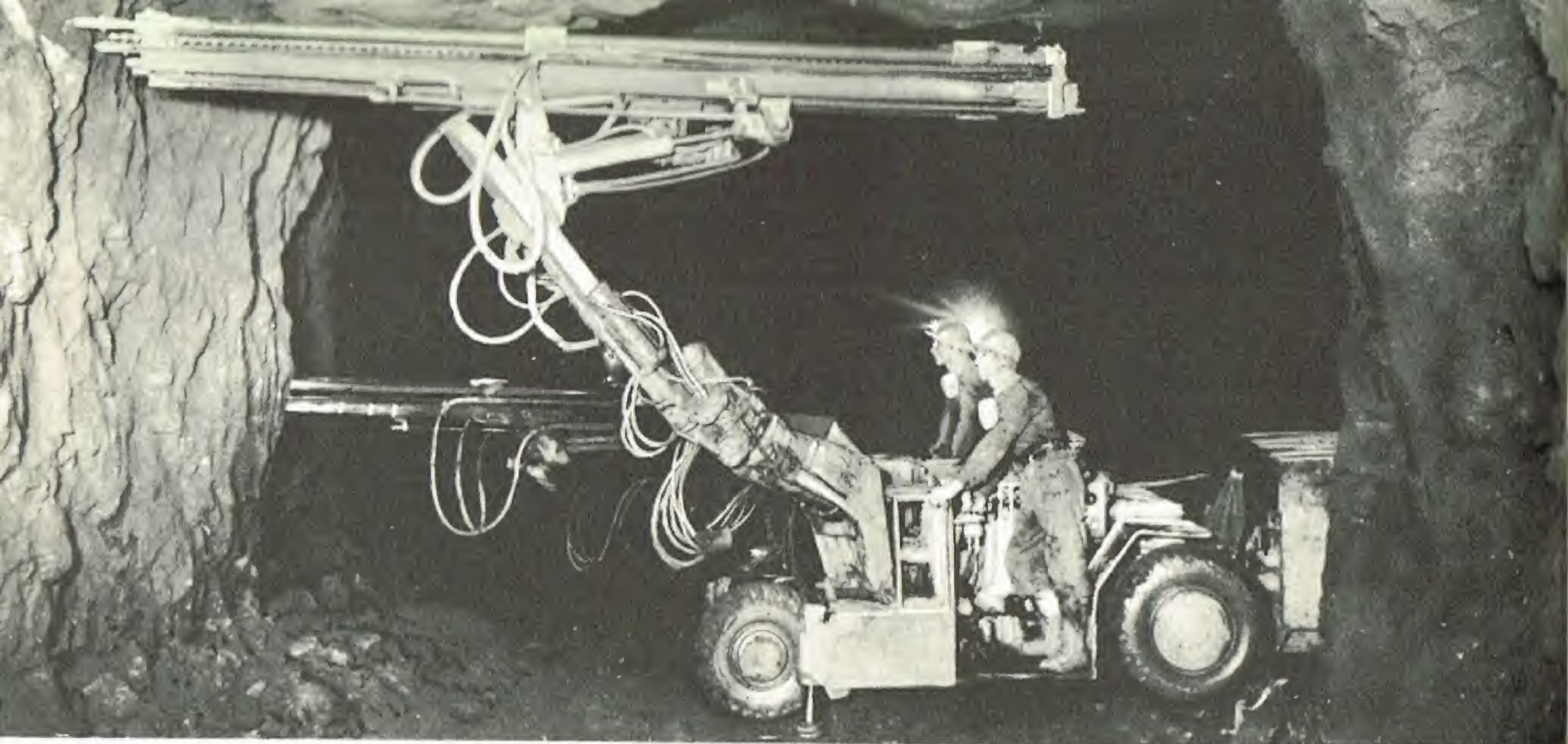


$$2BO_3H_3 \longrightarrow 3H_2O + B_2O_3.$$

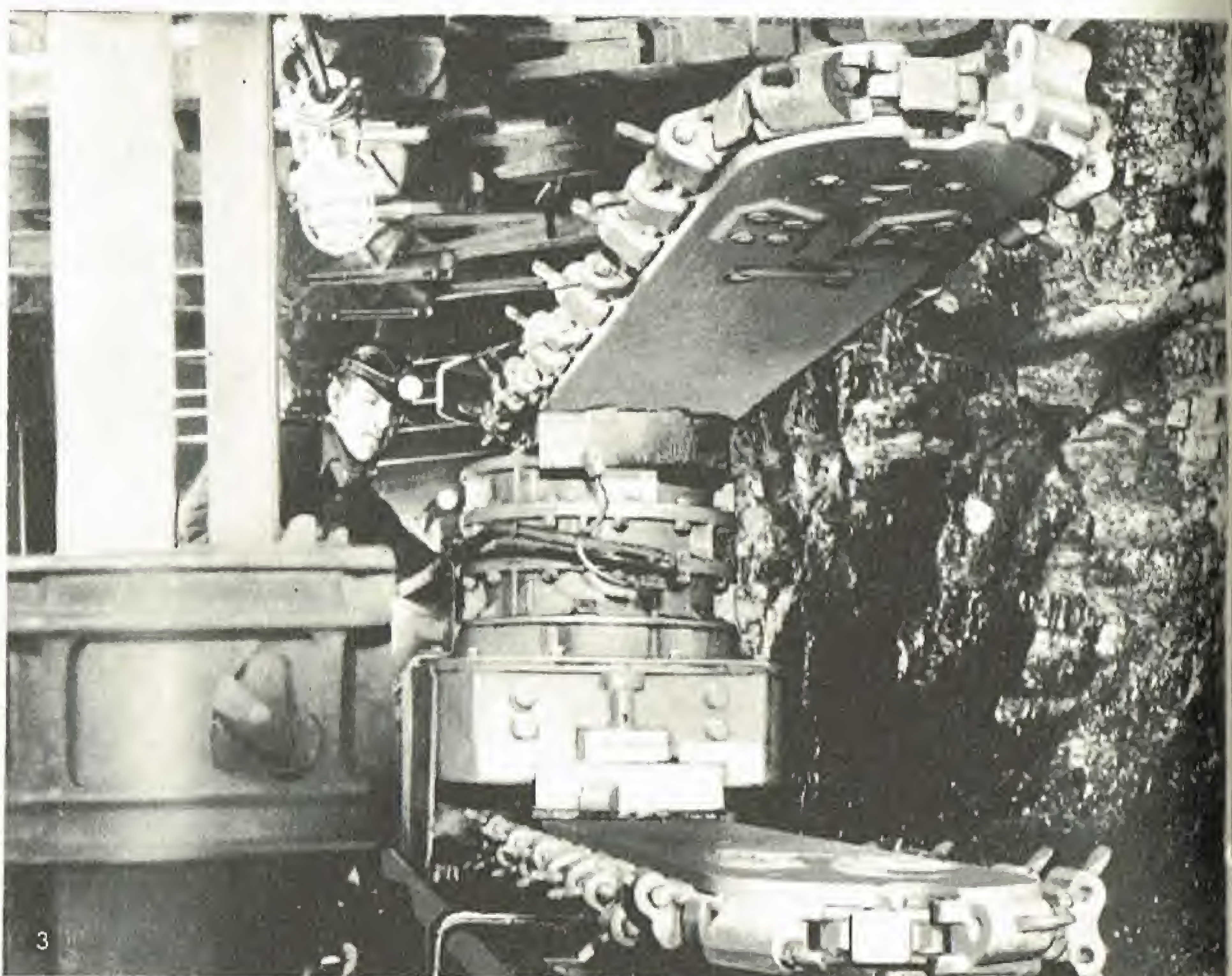
Aplicaciones. — El ácido bórico sirve como antiséptico (agua boricada); se le emplea también en la fabricación de velas.

El bórax es un disolvente muy enérgico de los óxidos, por lo que se le utiliza para el decapado y la soldadura de diversos metales, así como en cerámica. En la industria textil, preserva el algodón de la combustión. En fin, entra en la composición de ciertos barnices secantes y sirve para la preparación de esmaltes.

Raymond Touren






3



MINA DE CARBÓN

La lámina representa algunos aspectos de la extracción del carbón en una mina (v. p. 342): 1. Derribo del carbón mediante una perforadora montada sobre "jumbo"; 2. Jaula automotora transportando el carbón hasta los ascensores; 3. Perforadora de doble brazo; 4. Correa sin fin para el transporte del carbón extraído; 5. Otro aspecto del trabajo con el martillo neumático

(Fot. Schmidt; U. S. I. S.; Charbonnages de France)


5



Mina de cobre de Chiquicamata (Chile), la mayor del mundo a cielo abierto (*Fot. Instituto de Geografía de la Universidad de Chile*)

Metales

Generalidades

Definición y generalidades. — **Propiedades físicas:** Conductividades calorífica y eléctrica. Propiedades magnéticas. Densidad. Fusibilidad. Maleabilidad. Ductilidad. Tenacidad. Dureza. Aleaciones. Metales de comercio. — **Propiedades químicas:** Acción de los halógenos. Acción del oxígeno. Acción del agua. Acción de los ácidos. Acción de los álcalis. Acción del óxido de carbono. Acción de los cuerpos orgánicos. Acción del hidrógeno. Acción del azufre. Acción del nitrógeno. Acción del fósforo y el arsénico. Acción del carbono, el silicio y el boro. Acción de un metal sobre otro metal. — **Clasificación de los metales:** Clasificación electroquímica (o serie de tensiones). Clasificación periódica (o de Mendeleev). — **Estado natural.** — **Principales tipos de compuestos metálicos:** *Nitratos:* Propiedades. Estado natural y preparación. *Sulfatos:* Propiedades. Reducción por el carbón. Estado natural y preparación. *Carbonatos:* Propiedades. Reducción. Estado natural y preparación. *Cloruros:* Propiedades. Acción del hidrógeno. Estado natural. Preparación. *Óxidos e hidratos:* Acción del calor. Acción del hidrógeno. Acción del carbón. Estado natural. Preparación. *Sulfuros:* Propiedades. Solubilidad. Fusibilidad. Acción del oxígeno. Clasificación de los sulfuros. Preparación. *Fosfatos:* Preparación. Propiedades. *Carburos metálicos:* Preparación y propiedades. — **Análisis mineral cualitativo.** — **Análisis mineral cuantitativo**

Definición y generalidades. — Reciben el nombre de *metales* ciertos cuerpos simples dotados de propiedades físicas características, tales como el brillo metálico cuando están pulidos, la conductividad calorífica y la conductividad eléctrica.

Desde el punto de vista químico, los metales se pueden combinar con los metaloides, dando compuestos solubles en el agua y electrolizables. En las soluciones de este tipo, los metales pierden uno o varios electrones periféricos y adquieren la constitución de iones cargados positivamente (cationes), por lo que se dice que los metales son electropositivos. Si se efectúa la electrólisis de una de estas soluciones, los iones metálicos afluyen hacia el cátodo (polo negativo), en donde se depositan en forma de metal. Recordemos que, por el contrario, los metaloides son electronegativos. Por otra parte, no se puede establecer una distinción neta entre metales y metaloides, excepto en lo que respecta a las columnas extremas de la clasificación de Mendeleev. Así, el arsénico, situado en el centro, posee por una parte brillo metálico, y

por otra propiedades muy parecidas a las del fósforo; el antimonio, el silicio, el germanio y el boro presentan igualmente ciertas propiedades características de los metaloides, y otras de los metales. Por tal razón, estos cinco elementos reciben también el nombre de semimetales.

Propiedades físicas

Conductividades calorífica y eléctrica. — La plata es el metal que conduce mejor el calor; a continuación vienen el cobre y el aluminio. No se emplea la plata en las aplicaciones corrientes a causa de su precio elevado; se la reemplaza por el cobre, con el que se fabrican las calderas de las destilerías y de las cervecerías, así como los tubos de las calderas de las locomotoras. En ciertos casos, se utiliza el aluminio, que es más barato.

La conductividad eléctrica de los metales varía en el mismo sentido que la conductividad calorífica. Pero, mientras que ésta es independiente de la temperatura, la conductividad eléctrica disminuye cuando aumenta la temperatura, o, lo que es lo mismo, su resistencia aumenta. A temperaturas muy bajas, la resistencia varía proporcionalmente a la quinta potencia de la temperatura absoluta. Ciertos metales, como el mercurio y el plomo, presentan el fenómeno de supraconductividad: en la zona próxima al cero absoluto, su resistencia eléctrica es nula.

Propiedades magnéticas. — Se distinguen los metales *diamagnéticos*, que, rechazados por el imán, se orientan perpendicularmente a la línea que une los polos de éste, y los *paramagnéticos*, que son atraídos por el imán y se orientan en el sentido del campo magnético. A los metales que poseen un paramagnetismo muy elevado se les llama *ferromagnéticos*.

Densidad. — En general, la densidad de los metales fundidos es menor que cuando se presentan en estado sólido. Se llama metales pesados a aquellos cuya densidad es mayor que 6, y ligeros a los que poseen una densidad menor que 6. La gama de las densidades es muy extensa, como se puede observar en la tabla siguiente:

Densidad de algunos metales

Osmio	22,48	Cobre	8,7
Platino	21,5	Hierro	7,8
Oro	19,4	Estaño	7,3
Mercurio	13,6	Cinc	6,9
Plomo	11,5	Aluminio	2,6
Plata	10,4	Litio	0,53

Fusibilidad. — La temperatura a la que funden los metales es muy variable, como se pone de manifiesto en los ejemplos siguientes:

Temperatura de fusión de algunos metales

Iridio	2 350° C	Plata	962° C
Platino	1 755° C	Cinc	419° C
Hierro	1 510° C	Plomo	327° C
Cobre	1 085° C	Estaño	232° C
Oro	1 085° C	Mercurio	-39° C

Maleabilidad. — La maleabilidad es la propiedad que poseen los metales de poderse reducir a hojas más o menos delgadas, sin agrietarse, al ser sometidos a la acción del laminador o del martillo.

El laminador está constituido por dos cilindros de acero cuyos ejes paralelos se pueden acercar más o menos, a voluntad. La barra de metal que se desea laminar es introducida en el espacio libre que queda entre los dos cilindros; éstos giran en sentido opuesto, arrastrando en su movimiento la barra, que se adelgaza, alargándose y ensanchándose. La hoja obtenida así vuelve a pasar varias veces entre los cilindros, disminuyendo en cada una de las operaciones sucesivas la distancia que los separa.

En general, los metales se vuelven quebradizos cuando se les pasa varias veces entre los cilindros del laminador, pues este tratamiento origina las llamadas bandas de resbalamiento, en las que la resistencia da la masa cristalina del metal disminuye considerablemente. El metal vuelve a adquirir sus propiedades primitivas si se le calienta a una temperatura adecuada, generalmente elevada. Esta operación se conoce con el nombre de *recocido*.

Como, en la mayor parte de los casos, la resistencia a la deformación varía con la temperatura, es menor cuando se calienta previamente el metal. Así, se lamina el hierro al rojo, calentándolo después de cada pasada por el laminador (fabricación de chapas).

De todos los metales, el más maleable es el oro. Trabajado por *percusión*, se pueden obtener hojas muy finas de este metal, llamadas panes de oro, cuyo espesor es del orden de 1/25 000 de milímetro.

Los instrumentos de cobre se elaboran por percusión o por *embutido*.

La clasificación de los metales más corrientes por orden de maleabilidad decreciente es la siguiente: oro, plata, aluminio, cobre, estaño, platino, plomo, cinc, hierro.

Ductilidad. — La ductilidad es la propiedad que poseen los metales de poder estirarse para formar alambres.

Los alambres se obtienen introduciendo el extremo de una barra metálica en el agujero cónico de una *hilera*, y ejerciendo a continuación una tracción para que dicha barra pueda pasar a través del agujero. El espesor del alambre disminuye, y al mismo tiempo éste se alarga. Se repite esta operación cierto número de veces, disminuyendo progresivamente el diámetro del agujero cónico. Finalmente, se obtiene un alambre largo y fino. Al pasar por la hilera, el metal se vuelve quebradizo.

Tenacidad. — La *ductilidad* de un metal depende no sólo de su *maleabilidad*, sino también de su *tenacidad*, es decir, de su resistencia a la ruptura.

Si tomamos, por ejemplo, un alambre de hierro de 1 mm² de sección y lo atamos en un extremo, mientras que en el otro vamos colgando pesas cada vez mayores, observaremos que al principio se alarga y que finalmente se rompe cuando el peso total colgado es de 64 kilogramos. Este peso determina la tenacidad del hierro.

La tenacidad de los metales más empleados es indicada por las cifras siguientes:

Hierro	64	Oro	27
Cobre	41	Cinc	13
Platino	35	Estaño	3
Plata	30	Plomo	2

Observación. La tenacidad del acero es superior a la del hierro. Según la composición del acero considerado, la tenacidad puede variar de 83 a 92.

Dureza. — La dureza es la resistencia que opone un metal a dejarse rayar. Los metales más usuales pueden clasificarse como sigue, por orden de dureza decreciente: cromo, hierro, níquel, platino, cobre, oro, plata, plomo.

Aleaciones. — Solamente se utilizan unos pocos metales en estado puro, a saber: el hierro, el cobre, el cinc, el plomo, el estaño, el platino, el mercurio, el aluminio y el níquel.

Fundiendo juntos dos o varios metales, y dejándolos solidificarse, se obtiene una masa de apariencia homogénea llamada *aleación*. Las aleaciones tienen una importancia considerable desde el punto de vista industrial, pues se conducen como verdaderos metales, aunque desde el punto de vista físico manifiestan propiedades diferentes de las de los metales que las constituyen. Modificando las proporciones de los metales que forman una aleación, se pueden obtener substancias metálicas dotadas de propiedades que no posee ningún metal considerado por separado.

Así, el oro es demasiado blando para la confección de joyas y monedas, por lo que se le añade un poco de cobre, con el que forma una aleación dura y resistente.

Al lado de las aleaciones propiamente tales, citaremos los *aceros*, que se obtienen incorporando al hierro cantidades muy pequeñas de un metaloide, el carbono, en la proporción de 4/1 000 a 1/100.

Metales de comercio. — Los metales que se expenden en el comercio no son químicamente puros: contienen siempre una proporción muy pequeña de diversos metaloides (carbono, silicio, fósforo). El hierro contiene siempre carbono y silicio. El níquel va acompañado de hierro, cobre y carbono. El cinc contiene plomo, hierro y silicio. La presencia de estos vestigios de materias extrañas puede alterar considerablemente las propiedades físicas de un metal. Así, por ejemplo, el hierro que contiene vestigios de azufre y de fósforo es quebradizo en frío. La fusibilidad del hierro aumenta cuando encierra vestigios de carbono y de silicio.

Propiedades químicas

Acción de los halógenos. — De los halógenos, el flúor es el que presenta la mayor capacidad de reacción; vienen a continuación el cloro, luego el bromo y finalmente el yodo. Los metales muy electropositivos (alcalinos y alcalinotérreos) se dejan atacar con mayor facilidad que los demás.

A la acción de los halógenos va ligada la de los hidrácidos correspondientes, pero, en este caso, la facilidad de reacción aumenta según el peso molecular del ácido: la descomposición del ácido clorhídrico es más difícil que la del ácido yodhídrico, pues el hidrógeno tiene igualácido nítrico concentrado vuelve el hierro "pasivo").

Acción del oxígeno — La mayor parte de los metales (excepto el oro, la plata y los metales del grupo del platino) se oxidan al aire, a temperatura más o menos elevada. Esta oxidación es exotérmica. Además, depende del estado de agregación y, eventualmente, de la aleación en la que entra el metal como constituyente. Si el aire es húmedo, el ataque es más fácil: el hierro se cubre de orín, y el cobre forma cardenillo. A veces, sucede que el metal se cubre con una película protectora de hidrocarbonato.

Acción del agua. — La mayor parte de los metales se combinan fácilmente con el oxígeno; gracias a esta propiedad pueden, en general, descomponer el agua, captando el oxígeno de ésta, mientras que el hidrógeno queda en libertad. Esta descomposición tiene lugar a temperaturas variables, según el metal considerado.

Los metales llamados preciosos (plata, oro, grupo del platino) y el mercurio no descomponen el agua, cualquiera que sea la temperatura a la que se intente la reacción.

La descomposición del agua tiene lugar por el cobre al rojo blanco; por el estaño y el titanio al rojo vivo; por el hierro y el cinc al rojo obscuro; por el magnesio, el calcio, etc., divididos hacia 100° C; el potasio, el sodio y el litio descomponen el agua a la temperatura ordinaria.

En general, la reacción se produce tanto más fácilmente cuanto más electropositivo es el metal.

Acción de los ácidos. — Con los ácidos, se obtiene una sal e hidrógeno:



$$2ClH + Fe \rightarrow Cl_2Fe + H_2.$$



$$SO_4H_2 + Zn \rightarrow SO_4Zn + H_2.$$

En general, el ataque es más fácil cuando el ácido está diluido (el ácido nítrico concentrado vuelve el hierro "pasivo").

Acción de los álcalis. — El plomo, el estaño, el cromo, el aluminio, el cinc y el titanio dan con los álcalis hidróxidos anfóteros, que se disuelven en un exceso de reactivo, originando iones estables solamente en medio alcalino.

El amoniaco da, ya compuestos de adición amidometálicos ($Ca[NH_3]_6$), ya amidas (NH_2Na), ya nitruros (NAl). El acetileno conduce a los acetiluros (C_2HK).

Acción del óxido de carbono. — En ciertos casos, se forman combinaciones del tipo hierro-pentacarbonilo $Fe(CO)_5$, o niquel-tetracarbonilo $Ni(CO)_4$.

Acción de los cuerpos orgánicos. — El sodio forma un alcoholato al reaccionar con un alcohol. Se combina también con los derivados halogenados.

El cinc y el magnesio dan lugar a compuestos organometálicos.

Acción del hidrógeno. — Los metales alcalinos y alcalinotérreos (v. CLASIFICACIÓN PERIÓDICA, abajo) dan hidruros. Otros metales absorben el hidrógeno sin dar un compuesto bien definido.

Acción del azufre. — Al igual que el oxígeno, el azufre se combina con los metales, desprendiendo calor. Se obtiene el mejor resultado calentando el azufre en flor y el metal finamente dividido.

Acción del nitrógeno. — Se obtienen nitruros, en los que el metal presenta a veces una valencia distinta a la habitual.

Acción del fósforo y el arsénico. — Estos metaloides forman fosfuros y arseniuros con la mayor parte de los metales.

Acción del carbono, el silicio y el boro. — Casi todos los metales dan compuestos a temperatura elevada (por ejemplo: C_2Ca). En el caso del hierro, se habla de cementación (Fe_3C).

Acción de un metal sobre otro metal. — Las aleaciones formadas pueden corresponder, en ciertos casos, a soluciones sólidas o a compuestos definidos.

Clasificación de los metales

Existen actualmente dos clasificaciones principales.

Clasificación electroquímica (o serie de tensiones). — Esta clasificación se funda en la electropositividad. Los metales se ordenan según la dificultad que manifiestan por depositarse en el cátodo durante una electrólisis, es decir, según el potencial mayor o menor que se requiere para que pase la corriente. Las cifras que se indican en la tabla siguiente representan la diferencia de potencial entre un electrodo de un metal y la solución de una de sus sales a la concentración normal (un ion-gramo por litro). Se toma como base la diferencia de potencial que se necesita para transformar un ion H^+ en hidrógeno gaseoso, a la que se le atribuye el valor 0.

Li	2,96	Co	0,29
K	2,92	Ni	0,22
Na	2,71	Sn	0,135
Ca	2,7	Pb	0,122
Mg	2,4	H	0
Be	1,7	Sb	—0,1
Al	1,6	Bi	—0,2
Mn	1	As	—0,3
Zn	0,76	Cu	—0,345
Cr	0,56	Ag	—0,8
Fe	0.44	Pt	—0,9
Cd	0.4	Hg	—0,9
Tl	0,34	Au	—1,5

Se ve inmediatamente que los metales alcalinos y los alcalinotérreos (v. CLASIFICACIÓN PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS, p. 249) son los más electropositivos, lo que quiere decir que tienen gran tendencia a pasar a la solución perdiendo electrones. Se comprende igualmente por qué el cinc desplaza el cobre, al introducir el primero en una solución que contenga una sal del segundo. Al final de la lista se encuentran los metales nobles y preciosos, que se obtienen fácilmente por electrólisis y que, en cambio, se oxidan con gran dificultad.

La serie de tensiones coincide, poco más o menos, con la antigua clasificación de Thenard, basada en la facilidad de oxidación de los metales.

Clasificación periódica (o de Mendeleev). — Ordenando los elementos por pesos atómicos crecientes (en realidad se les clasifica por orden creciente de número atómico, para evitar ciertas inversiones debidas a la existencia de isótopos), se observa una periodicidad de las propiedades químicas; de manera especial, los elementos de una misma columna, es decir, de un mismo grupo o familia, poseen la misma valencia.

En lo que respecta a los metales, en la primera columna se encuentran los alcalinos: litio, sodio, potasio, rubidio y cesio, así como el cobre, la plata y el oro. El amonio, que no existe en estado de libertad y si en forma iónica, se estudia con los metales alcalinos.

La segunda columna comprende los alcalinotérreos: berilio, magnesio, calcio, estroncio, bario y radio, así como el cinc, el cadmio y el mercurio.

La tercera columna es la de los metales térreos: aluminio, tierras raras o escasas, actinio.

A continuación se hallan los elementos de valencias 4, 5 y 6.

Entre dos familias pueden existir cuerpos intermedios o familias particulares compuestas por metales cuyo comportamiento químico es muy semejante: grupo de las tierras raras, grupo del platino.

Esta periodicidad de las propiedades se interpreta a partir de la estructura electrónica de los átomos (v. QUÍMICA GENERAL, p. 249).

Estado natural

Son contados los metales que se hallan en estado nativo (oro, platino, a veces cobre, mercurio, bismuto, plata, hierro).

Las principales clases de minerales de los que se extraen los metales son:

Los *óxidos* o *hidratos*: hierro (óxidos de hierro), cobre, estaño (casiterita), manganeso, cromo, aluminio (alúmina);

Los *sulfuros*: cobre, hierro (pirita), mercurio (cinabrio), plomo (galena), níquel, cinc (blenda), bismuto, plata, molibdeno;

Los *arseniuros* y los *sulfoarseniuros*: hierro, níquel, cobalto;

Los *carbonatos*: cinc, cobre, calcio, magnesio;

Los *silicatos*: aluminio, hierro, cinc, níquel, magnesio, metales alcalinos;

Los *sulfatos*: térreos y alcalinotérreos.

En cuanto a los tratamientos a que se someten estos minerales, v. METALURGIA, en los metales correspondientes.

Principales tipos de compuestos metálicos

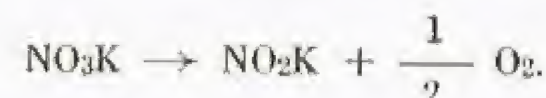
Nos limitaremos a estudiar los *nitratos*, los *sulfatos*, los *carbonatos*, los *cloruros*, los *óxidos*, los *sulfuros*, los *fosfatos* y los *carburos*.

Nitratos

Propiedades. — Todos los nitratos son solubles en el agua, excepto ciertos nitratos básicos de bismuto y mercurio; el agua descompone el nitrato de bismuto $(NO_3)_3Bi$, dando un precipitado blanco anacarado de subnitrato $NO_3Bi(OH)_2$ y ácido nítrico libre.

La adición de ácido hace retrogradar esta hidrólisis.

Por *efecto del calor*, los nitratos alcalinos funden; al rojo, se descomponen con desprendimiento de oxígeno y se transforman en nitritos:



$$NO_3K \longrightarrow NO_2K + \frac{1}{2} O_2.$$

Si se sigue elevando la temperatura, el nitrito se descompone a su vez, desprendiendo vapores rutilantes, y queda finalmente el óxido metálico anhidro, que ataca las paredes del crisol en el que se efectúa la operación.

Los nitratos metálicos se descomponen al rojo; se desprenden vapores rojos de dióxido de nitrógeno al mismo tiempo que oxígeno y queda en estado sólido el óxido correspondiente:



$$(NO_3)_2Pb \longrightarrow PbO + 2NO_2 + O;$$
$$(NO_3)_2Cu \longrightarrow CuO + 2NO_2 + O.$$

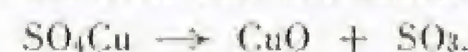
Los nitratos son oxidantes. Si se echa un poco de nitrato potásico sobre las ascuas, deflagra, y al mismo tiempo el carbón arde con llama muy viva. Mezclando nitrato potásico, carbón y azufre, se obtiene la *pólvora negra*.

Estado natural y preparación. — Algunos nitratos se forman en la naturaleza. Los yacimientos más importantes se encuentran en Chile (Iquique, Antofagasta, Taltal), que abastece el 95% de la producción mundial. Además de los nitratos de potasio, sodio y calcio que existen en la naturaleza, se pueden preparar todos los demás nitratos por acción del ácido nítrico sobre el metal o sobre el óxido o el carbonato correspondiente.

Sulfatos

Propiedades. — Los sulfatos son solubles en el agua, excepto los sulfatos de plomo y bario; los sulfatos de estroncio y calcio son poco solubles.

El *calor* no ejerce acción alguna sobre los sulfatos alcalinos neutros, ni sobre los sulfatos alcalinotérreos y el sulfato de plomo. Todos los demás se descomponen a una temperatura que depende de la naturaleza del metal. Si la temperatura es bastante poco elevada para que no se verifique la descomposición del anhídrido sulfúrico originado en la reacción, éste destila: tal es el caso del sulfato de cobre:



$$SO_4Cu \longrightarrow CuO + SO_3.$$

Reducción por el carbón. — Los sulfatos alcalinos o alcalinotérreos se transforman en sulfuros:



$$SO_4K_2 + 4C \longrightarrow SK_2 + 4CO;$$
$$SO_4Ba + 4C \longrightarrow SBa + 4CO.$$

Los sulfatos de los demás metales dan un residuo de sulfuro y anhídrido carbónico:



$$SO_4Pb + 2C \longrightarrow SPb + 2CO_2.$$

Si hay un exceso de sulfato, éste reacciona con el sulfuro de plomo formado, y finalmente queda el metal en libertad:



$$SPb + SO_4Pb \longrightarrow 2Pb + 2SO_2.$$

Estado natural y preparación. — Cierto número de sulfatos: los de bario, calcio y magnesio, así como un sulfato doble de aluminio y potasio (alunita), se encuentran en la naturaleza. Los sulfatos se pueden preparar por los procedimientos siguientes:

1° *Acción del ácido sulfúrico sobre el metal, el óxido, el carbonato o el sulfuro correspondiente.*

Los sulfatos de cinc y hierro se obtienen por acción del ácido sulfúrico diluido en frío. El ácido concentrado da, en caliente, los sulfatos de cobre, plata y mercurio.

2° *Oxidación lenta o tostación de los sulfuros.*

La pirita (FeS_2) humedecida con agua se oxida poco a poco y se transforma en sulfato de hierro.

3° *Por doble descomposición.*

Los sulfatos insolubles, por ejemplo los de bario y plomo, se pueden obtener tratando un sulfato alcalino disuelto con una sal soluble del metal:



$$SO_4K_2 + (NO_3)_2Ba \rightarrow SO_4Ba + 2NO_3K.$$

Se llama *alumbres* a los compuestos de fórmula general $(SO_4)_3M'''_2$, $SO_4M'_2$, $24H_2O$; además, existe otra serie de sales dobles de magnesio y metal alcalino, de fórmula general SO_4M'', $SO_4M'_2$, $6H_2O$.

Carbonatos

Propiedades. — Todos los carbonatos metálicos son insolubles en el agua, excepto los carbonatos alcalinos.

El *calor* no ejerce efecto sobre los carbonatos alcalinos neutros; los demás se descomponen a temperaturas más o menos elevadas, desprendiendo anhidrido carbónico y dejando como residuo el óxido correspondiente. Así, el carbonato cálcico se descompone hacia 900° C:



$$CO_3Ca \rightarrow CaO + CO_2,$$

y el de estroncio al rojo vivo.

Reducción. — Los carbonatos se reducen si se les calienta con carbón: en la reacción se desprende óxido de carbono y queda como residuo el óxido del metal, o el propio metal cuando el carbón es capaz de reducir el óxido formado:



$$CO_3Ba + C \rightarrow BaO + 2CO.$$
$$CO_3Pb + 2C \rightarrow Pb + 3CO.$$

Al ser tratados por los ácidos, los carbonatos se descomponen, desprendiendo anhidrido carbónico. Al lado de los carbonatos, existen los bicarbonatos o carbonatos ácidos, en los que solamente se halla substituido por un metal uno de los dos hidrógenos disponibles.

Estado natural y preparación. — En la naturaleza existe gran número de carbonatos: carbonatos de sodio, calcio, bario, estroncio, magnesio, hierro, manganeso, cinc, cobre, plomo, etc.

Se pueden preparar los carbonatos insolubles por doble descomposición entre un carbonato alcalino soluble y una sal soluble del metal correspondiente.

Cloruros

Propiedades. — En general, los cloruros son sólidos; sin embargo, algunos de ellos son líquidos a la temperatura ordinaria: tal es el caso del tetracloruro de estaño Cl_4Sn.

Por el *calor*, los cloruros sólidos funden a temperaturas más o menos altas. Son *volátiles*. Al elevar la temperatura, los cloruros de oro y platino se descomponen: el cloro se desprende, mientras que el metal queda como residuo. Ahora bien, si se calienta con precaución, el cloruro platínico Cl_4Pt se transforma en cloruro platinoso Cl_2Pt insoluble. Operando de igual manera, el cloruro cúprico Cl_2Cu puede transformarse en cloruro cuproso $ClCu$ insoluble. Son también insolubles el cloruro de plata $ClAg$ y el cloruro mercurioso Cl_2Hg_2 (calomelanos). El cloruro de plomo es muy poco soluble en frío.

Los demás cloruros son solubles en el agua.

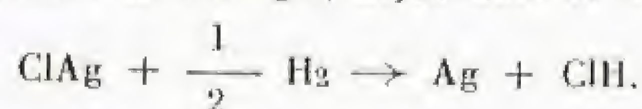
El agua descompone algunos cloruros metálicos. Así, el cloruro de bismuto da un precipitado blanco de $ClOBi$, y el líquido se vuelve ácido por formarse ácido clorhídrico en la reacción:



$$Cl_3Bi + H_2O \rightarrow ClOBi + 2ClH,$$

pero, al mismo tiempo, este líquido ácido disuelve una parte del cloruro, sin descomponerlo.

Acción del hidrógeno. — El hidrógeno reduce determinados cloruros, tales como el cloruro de plata y el percloruro de hierro, que, calentados en una corriente de este gas, dejan libre el metal:



$$ClAg + \frac{1}{2} H_2 \rightarrow Ag + ClH.$$

Estado natural. — El cloruro sódico existe en el agua del mar, de donde se extrae (sal marina). El agua del mar contiene también cloruro potásico y cloruro de magnesio.

La evaporación de mares salinos, ocurrida en épocas geológicas anteriores, ha dado lugar a la formación de yacimientos de cloruros ($ClNa$, ClK, Cl_2Mg, $6H_2O$), que se explotan actualmente.

El cloruro de plata que existe en la naturaleza constituye un mineral del que se extrae el metal.

Preparación. — 1° *Acción del cloro sobre el metal.*

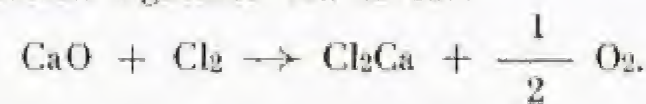
Se pueden preparar así el cloruro de estaño Cl_4Sn y el cloruro férrico Cl_3Fe.

2° *Acción del ácido clorhídrico sobre el metal.*

El ácido clorhídrico gaseoso o disuelto ataca cierto número de metales. En estado gaseoso, reacciona con el hierro en caliente, dando lugar al cloruro ferroso Cl_2Fe. Disuelto, ataca el hierro y el cinc, formando los cloruros correspondientes y desprendiendo hidrógeno.

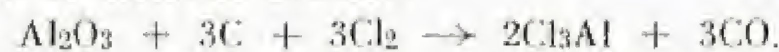
3° *Acción del cloro sobre un óxido o sobre una mezcla de óxido y carbón.*

El cloro reacciona a temperatura más o menos elevada; así, al rojo, se obtiene la reacción siguiente con la cal:



$$CaO + Cl_2 \rightarrow Cl_2Ca + \frac{1}{2} O_2.$$

El cloro no reacciona con la alúmina, pero si se hace una mezcla de alúmina y carbón, ésta reacciona al rojo con una corriente de cloro, dando cloruro de aluminio anhidro:



$$Al_2O_3 + 3C + 3Cl_2 \rightarrow 2Cl_3Al + 3CO.$$

4° *Acción del ácido clorhídrico sobre el óxido, el sulfuro y el carbonato.*

Se puede preparar, por ejemplo, el cloruro cálcico disolviendo el carbonato cálcico en ácido clorhídrico:



$$CO_3Ca + 2ClH \rightarrow H_2O + CO_2 + Cl_2Ca.$$

Se puede obtener el cloruro de bario disolviendo el sulfuro de bario en ácido clorhídrico:



$$2ClH + SBa \rightarrow Cl_2Ba + SH_2.$$

5° *Doble descomposición.*

Si se calienta una sal metálica con un cloruro metálico poco volátil, como un cloruro alcalino, se obtiene un cloruro volátil por doble descomposición. Se puede preparar por este método el cloruro mercúrico, o sublimado corrosivo, tratando el sulfato mercúrico con sal marina y calentando:



$$SO_4Hg + 2ClNa \rightarrow SO_4Na_2 + Cl_2Hg.$$

Óxidos e hidratos

Los óxidos metálicos han sido definidos en química mineral (v. página 544).

Acción del calor. — 1° *Ciertos óxidos se reducen completamente por efecto del calor.* Tal es el caso de los óxidos de oro, platino, plata y mercurio.

2° *Otros óxidos no sufren reducción alguna.* Se encuentran en este caso los compuestos Al_2O_3, MgO, ZnO, CaO, etc.

3° Por último, *algunos óxidos pasan a un grado de oxidación inferior.* Tal es el caso del bióxido de manganeso MnO_2, que, por el calor, se transforma en un óxido inferior, dejando oxígeno en libertad:



$$3MnO_2 \rightarrow Mn_3O_4 + O_2.$$

Observación. La mayor parte de los óxidos son fusibles, e incluso algunos son volátiles; los óxidos de los metales alcalinotérreos, la magnesia y la alúmina son infusibles en los hogares ordinarios; sin embargo, la alúmina puede fundirse en el soplete oxhídrico. La cal funde en el horno eléctrico.

Los hidratos metálicos pierden agua y se transforman en óxidos anhidros al ser sometidos a una temperatura más o menos elevada. La potasa, la sosa y la barita resisten a la acción del calor.

Acción del hidrógeno. — Ciertos óxidos, tales como los de los metales alcalinos y alcalinotérreos, la magnesia, la alúmina, etc., no son atacados por el hidrógeno.

Algunos se reducen al estado metálico, como, por ejemplo, el óxido de cobre. Otros pasan a un estado de oxidación inferior; se encuentran en este caso los óxidos MnO_2 y BaO_2.

Acción del carbón. — Ciertos óxidos dejan en libertad el metal cuando se les mezcla con carbón. Esta reacción tiene lugar con los óxidos de cobre, hierro, plomo, cinc, y, según la temperatura requerida para la reducción, se desprende anhidrido carbónico u óxido de carbono.

Por este procedimiento se pueden reducir la sosa y la potasa, pero el anhidrido carbónico originado en la reacción se combina con una parte de la base alcalina y da carbonato sódico o potásico; el carbonato puede reducirse a su vez operando a temperatura más elevada en presencia de un exceso de carbono. La preparación del potasio se basa en esta reacción.

En metalurgia se utiliza la acción del carbono sobre los óxidos para obtener gran número de metales. (V. Metalurgia, p. 351.)

Estado natural. — Los óxidos existen con gran profusión en la naturaleza, y constituyen en muchos casos los *minerales* que se explotan para la extracción de los metales.

La alúmina sirve para la preparación del aluminio.

Los óxidos de hierro se aprovechan para la obtención del hierro y de sus derivados.

El dióxido de manganeso, utilizado directamente en ciertas preparaciones (cloro), se emplea para la preparación de los ferromanganesos.

Los compuestos de fórmula general M'''_2O_3, $M''O$ se llaman *espinelas*.

Preparación. — 1° *Oxidación directa del metal* (por ejemplo: preparación del óxido de hierro). Al contacto del aire, el plomo se oxida a baja temperatura, dando *masicot* (PbO amorfo). Si la temperatura es suficientemente elevada para provocar la fusión, se obtiene *litargirio* (PbO cristalizado). El óxido de cinc o *blanco de cinc*, utilizado en pintura, se obtiene calentando el metal en una corriente de aire.

El mercurio expuesto al aire se oxida hacia 300° C, dando óxido mercúrico (precipitado *rojo*).

2° *Calcinación de una sal.* La calcinación del carbonato cálcico conduce a la formación de cal.

El sulfato de hierro calcinado deja como residuo óxido férrico finamente dividido *(colcótar)*.

3º *Desplazamiento de una base de una de sus sales solubles por una base soluble* (v. REGLAS DE BERTHOLLET, p. 248).

Existen óxidos básicos, óxidos ácidos, óxidos anfóteros (ZnO, Al_2O_3, etcétera) y óxidos salinos ($Pb_3O_4 = 2PbO + PbO_2$).

Los hidróxidos son los hidratos de los óxidos; solamente son solubles los hidróxidos de los metales alcalinos y alcalinotérreos y el de talio.

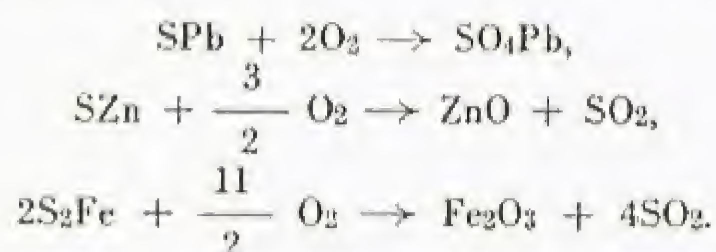
Sulfuros

Propiedades. — La mayor parte de los sulfuros naturales cristalizados poseen brillo metálico: sulfuro de plomo (galena), sulfuro de hierro (pirita), sulfuro de cobre y hierro (calcopirita). Carecen de él principalmente el sulfuro de mercurio (cinabrio) y el sulfuro de cinc (blenda). Los sulfuros obtenidos por precipitación son amorfos y presentan colores diversos.

Solubilidad. — Solamente son solubles en el agua los sulfuros de los metales alcalinos y alcalinotérreos.

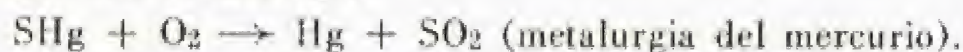
Fusibilidad. — En general, son más fusibles que los óxidos correspondientes del metal y que el propio metal.

Acción del oxígeno. — En general, se efectúa la oxidación (tostación). La reacción depende de la temperatura a la que se descompone el sulfuro:



$$SPb + 2O_2 \rightarrow SO_4Pb,$$
$$SZn + \frac{3}{2} O_2 \rightarrow ZnO + SO_2,$$
$$2S_2Fe + \frac{11}{2} O_2 \rightarrow Fe_2O_3 + 4SO_2.$$

Los sulfuros de los metales preciosos dejan en libertad el metal porque los óxidos correspondientes se descomponen por el calor. Otro tanto ocurre con el mercurio:



$$SHg + O_2 \rightarrow Hg + SO_2 \text{ (metalurgia del mercurio).}$$

Además, en presencia de agua, el oxígeno puede reaccionar con los sulfuros a la temperatura ordinaria. Tal es el caso de los sulfuros de los metales alcalinos y de la pirita de hierro; ésta se transforma en sulfato de hierro.

Clasificación de los sulfuros. — Al combinarse con un mismo metal, el azufre puede formar diferentes sulfuros; así, se conocen cinco compuestos de azufre y potasio: SK_2, S_2K_2, S_3K_2, S_4K_2, S_5K_2 y cuatro compuestos de azufre y hierro: SFe, S_4Fe_3, S_3Fe_2, S_2Fe.

Los monosulfuros de potasio y sodio (como los protóxidos con el agua) forman con el sulfuro de hidrógeno sulfhidratos SHK, $SHNa$, comparables a KOH, $NaOH$.

Los sulfuros alcalinos son sulfuros básicos; los sulfuros de oro, platino y estaño son sulfuros ácidos.

Preparación. — 1º *Combinación directa.* Se pueden preparar por este procedimiento casi todos los sulfuros; para ello, se calienta el metal en una corriente de vapor de azufre.

2º *Calcinación de un sulfato mezclado con carbón:*



$$SO_4Ba + 4C \rightarrow 4CO + SBa.$$

Se pueden obtener de esta manera todos los sulfuros de los metales cuyos sulfatos se descomponen por el calor, pues en estas condiciones el carbón reduce al estado metálico el óxido puesto en libertad, y a continuación el azufre se combina con el metal.

3º *Acción del sulfuro de hidrógeno sobre un hidróxido:*



$$SH_2 + KOH \rightarrow H_2O + SHK;$$

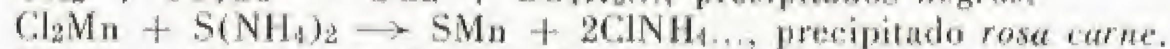
esta reacción permite obtener el sulfhidrato potásico.

4º *Acción del sulfuro de hidrógeno o de un sulfuro alcalino sobre una sal disuelta.* Puesto que la mayor parte de los sulfuros son insolubles en el agua, este procedimiento sirve para obtener gran número de sulfuros metálicos *(reglas de Berthollet)*.



$$(NO_3)_2Pb + SH_2 \rightarrow SPb + 2NO_3H,$$

y $SH_2 + SO_4Cu \rightarrow SCu + SO_4H_2$..., precipitados *negros*,



$Cl_2Mn + S(NH_4)_2 \rightarrow SMn + 2ClNH_4$..., precipitado *rosa carne*.

Ciertos sulfuros precipitan solamente en medio alcalino, mientras que otros son insolubles en medio ácido.

Fosfatos

Los fosfatos más corrientes corresponden al ácido ortofosfórico PO_4H_3, al ácido pirofosfórico $P_2O_7H_4$, y al ácido metafosfórico PO_3H. Los fosfatos naturales más abundantes son el apatito $3(PO_4)_2Ca_3$, F_2Ca y el fosfato tricálcico $(PO_4)_2Ca_3$. Los ortosfosfatos pueden ser monometálicos, dimetálicos o trimetálicos, según que el metal substituya uno, dos o tres hidrógenos del ácido ortofosfórico.

Preparación. — 1.º *Por acción del ácido fosfórico sobre las bases o los carbonatos:*



$$3CO_3Ca + 2PO_4H_3 \rightarrow (PO_4)_2Ca_3 + 3H_2O + 3CO_2.$$

2º *Los fosfatos insolubles se pueden obtener por doble descomposición, a partir de un fosfato alcalino:*



$$3PO_4H\ Na_2 + 2Cl_3Fe \rightarrow (PO_4H)_3Fe_2 + 6ClNa.$$

Propiedades. — Todos los fosfatos monometálicos son solubles en el agua; de los demás, lo son solamente los alcalinos. Los fosfatos bimetálicos se transforman en pirofosfatos por calcinación, y los monometálicos en metafosfatos.

Carburos metálicos

Preparación y propiedades. — Se preparan los carburos metálicos disolviendo carbón en los metales fundidos. Para estas preparaciones se utiliza el horno eléctrico. Entre los carburos, algunos son insensibles a la acción del agua, por ejemplo el carburo de cromo (C_2Cr_3), el de molibdeno (CMo) y sobre todo el de hierro (CFe_3), llamado cementita. En cambio, los carburos de los metales alcalinos y alcalinotérreos se descomponen por el agua, dando lugar a hidrocarburos.

Así, el carburo cálcico, C_2Ca, da acetileno.

El carburo de manganeso, CMn_3, da una mezcla de metano e hidrógeno.

El carburo de cerio, C_2Ce, da una mezcla de acetileno, metano e hidrocarburos líquidos.

Análisis mineral cualitativo

El análisis mineral cualitativo tiene por objeto determinar la naturaleza de los componentes de una solución, de una aleación, de un mineral, y en general de una substancia cualquiera. Se puede proceder por espectroscopia o químicamente, por vía húmeda.

En cuanto al análisis por vía húmeda, no nos extenderemos mucho, pues existen numerosos métodos. En los métodos clásicos, se dividían los cationes y los aniones en grupos, que se separaban por filtración. Los métodos modernos permiten identificar los elementos mediante reacciones específicas. Cuando la substancia que se desea analizar es sólida, hay que disolverla previamente. Para ello, se efectúa, según el caso, un ataque ácido (tratamiento por el ácido clorhídrico, el ácido nítrico o fusión con bisulfato) o un ataque alcalino (tratamiento o fusión con carbonato sódico, sosa u oxilita). Ciertos elementos se investigan directamente en la mezcla inicial y otros, por ejemplo los alcalinos, así como los acetatos y los nitratos, en una solución acuosa.

Análisis mineral cuantitativo

El análisis mineral cuantitativo, que sucede al análisis cualitativo, permite determinar las proporciones relativas de los componentes de una mezcla. Se puede operar, ya por métodos químicos (acidimetría, alcalimetría, yodometría, etc., o gravimetría), ya por métodos físicos (espectrofotometría por emisión o por absorción, colorimetría, potenciometría, electrólisis, polarografía, conductimetría, cromatografía, radiactividad, etc.).

Laboratorio de análisis del químico alemán Liebig



Metales alcalinos

Sodio y compuestos: Reseña histórica. Estado natural. Preparación. Propiedades físicas y químicas. Aplicaciones. Cloruro sódico. Bromuro sódico, yoduro sódico, fluoruoro sódico. Óxidos de sodio. Hidróxido sódico o sosa cáustica. Sales oxigenadas. Sulfato sódico y sal de Glauber: Propiedades. Aplicaciones. Tiosulfato sódico. Nitrato sódico. Fosfatos de sodio. Tetraborato sódico o bórax. Carbonato sódico: Aplicaciones. Bicarbonato sódico. Silicato sódico. Sulfuro sódico. Reconocimiento y determinación cuantitativa. — **Potasio y principales compuestos:** Reseña histórica. Estado natural. Preparación. Propiedades físicas y químicas. Cloruro potásico. Bromuro potásico. Yoduro potásico. Fluoruro potásico. Hidróxido potásico o potasa cáustica. Carbonato potásico. Preparación industrial. Procedimiento de Stassfurt. Cenizas de los vegetales. Churre de la lana. Melazas de la remolacha. Lejías de potasa. Clorato potásico. Sulfito potásico. Sulfato potásico. Bisulfato potásico o sulfato ácido de potasio. Nitrato potásico. Arseniato potásico. Cianuro potásico. Oxalato potásico. Reconocimiento y determinación cuantitativa. — **Rubidio. Cesio.** Reconocimiento del rubidio y del cesio. — **Litio:** Hidróxido de litio. Cloruro de litio. Carbonato de litio: Aplicaciones. Reconocimiento y determinación cuantitativa. — **Amonio:** Fuente de los productos amoniacales. Sales amoniacales: Cloruro amónico. Otros halogenuros. Clorato amónico. Sulfato amónico. Nitrato amónico. Fosfatos. Carbonato amónico. Sulfuros. Reconocimiento y determinación cuantitativa

Los metales alcalinos constituyen el 1[er] grupo de elementos, es decir, el que viene inmediatamente después de los gases nobles (grupo I a). Se conocen bien los cinco primeros de la serie, a saber: *litio, sodio, potasio, rubidio* y *cesio*. El sexto, el *francio*, ha sido descubierto recientemente. Los compuestos correspondientes de los metales alcalinos (cloruros, cloroplatinatos, alumbres, etc.) son isomorfos, así como los compuestos salinos del *amonio*. Este radical presenta grandes analogías con los metales de este grupo, por lo que lo estudiaremos al final del capítulo.

Estos metales, cuyos átomos poseen un solo electrón en la capa exterior, son monovalentes. La atracción electrostática entre el núcleo y este electrón es muy débil, por lo que el radio de los metales alcalinos es grande y su densidad poco considerable. Dada su estructura atómica, estos metales ceden fácilmente el electrón de valencia y pasan al estado iónico, lo que explica su carácter electropositivo muy marcado, así como otras propiedades que les son características, tales como su gran capacidad de reacción y de oxidación, la fuerza de las bases a que dan lugar, etc.

Sodio (Na = 22,991) y compuestos

Reseña histórica. — El sodio fue descubierto por **Davy** en 1807. Los compuestos del sodio, conocidos desde tiempos remotos, eran considerados en la Antigüedad como combinaciones de la sosa, estimada como elemento. La denominación *natrium*, que ha dado lugar al símbolo Na, designaba la sosa natural.

Estado natural. — El sodio no se encuentra libre en la naturaleza. En cambio, sus sales son muy abundantes. Las más importantes son el cloruro, que se halla disuelto en el agua del mar y en los manantiales salados, o en estado sólido (sal gema); el nitrato, que forma yacimientos importantísimos en Perú y sobre todo en Chile; el carbonato y el borato (aguas minerales), y las sales orgánicas (vegetales marinos).

Preparación. — *Procedimiento antiguo* (Gay-Lussac y Thenard). Descomposición del hidróxido por el hierro.

Procedimiento más moderno (Sainte-Claire Deville). Reducción del carbonato con carbón, en presencia de *carbonato cálcico*, que impide la separación, por *fusión* del carbonato y el carbón. La mezcla, pulverizada y tamizada, se calcina enérgicamente antes de introducirla en unos tubos o cilindros de hierro. El metal destila al ser calentado en el horno a 1 500° C, y se le recoge en el exterior. La reacción se formula:



$$CO_3Na_2 + 2C \rightarrow 2Na + 3CO.$$

Actualmente, se le prepara casi exclusivamente por electrólisis del cloruro sódico fundido. El metal afluye hacia el cátodo de hierro, en donde se separa y asciende a la superficie de la masa fundida, por ser más ligero que ésta. El sodio así obtenido se somete a fusión, y se conserva, formando bloques, en cajas de hojalata. A veces se le conserva también sumergido en benceno o petróleo.

Propiedades físicas y químicas. — El sodio es blando a la temperatura ordinaria. Es más ligero que el agua (D = 0,972), funde a 95,6° C y hierve al rojo blanco incipiente. Cuando se le corta, ofrece brillo metálico blanco de plata, pero la superficie de corte se empaña rápidamente. A la temperatura ordinaria, el oxígeno y el aire secos no ejercen sobre él acción alguna. En cambio, al aire húmedo se altera rápidamente, por formarse una mezcla de hidróxido y carbonato sódicos. El agua lo descompone en frío.

Se disuelve en el mercurio, formando una amalgama Hg_6Na.

El sodio se combina con los demás metales alcalinos, produciendo aleaciones. Se disuelve en el amoniaco, dando lugar a solvatos de color violeta intenso.

Aplicaciones. — Se emplea para la extracción del aluminio, el boro, el magnesio y el silicio. Además, sirve para la preparación del cianuro sódico y la amida sódica. Se utiliza como reductor en el laboratorio y, en la industria, en los lavaderos de oro, para la obtención de este metal.

Cloruro sódico (ClNa). — Muy abundante en la naturaleza, se extrae de las minas (Wieliczka) [Polonia], Stassfurt, cerca de Magdeburgo [Prusia] y Cardona [España]). Cuando forma capas compactas, se saca en bloques; si está diseminado en capas de arcilla, se inundan las galerías con agua y se recupera la sal por evaporación.

La sal marina se extrae del agua de mar evaporando ésta al aire libre (salinas). Se procede de igual manera cuando se trata de lagos salinos subterráneos; en este caso se extrae el agua mediante bombas. La sal que se obtiene a partir del agua salada es de color *gris*, pues contiene impurezas de sulfato y cloruro magnésicos, de sulfato cálcico y de arcilla. Se purifica por evaporación en unas calderas grandes y planas, por efecto del calor. Se forma primeramente un precipitado de sulfato doble de sodio y calcio, poco soluble, que se separa; a continuación, se deposita la *sal blanca*, también llamada sal común.

La sal marina pura es blanca, y cristaliza en cubos que se agrupan formando *pirámides*. Funde al rojo: D = 2,10. Su solubilidad varía muy poco con la temperatura. Es insoluble en el alcohol absoluto. Se disuelve un poco en el alcohol ordinario; esta solución arde con llama amarilla, característica del sodio.

Se emplea como condimento en la alimentación del hombre; a causa de las impurezas de cloruro y sulfato de magnesio que la acompañan, la sal común es higroscópica, es decir, fija el agua del aire, por lo que es tratada con fosfato sódico a fin de obtener la llamada sal de mesa. Sirve también en la agricultura y en la industria. En efecto, la sal marina constituye la base de tres industrias químicas muy importantes: la sosa, el cloro y el carbonato sódico. En el laboratorio se utiliza para las saladuras, operaciones que tienen por objeto precipitar los no electrólitos de sus soluciones.

Bromuro sódico (BrNa), yoduro sódico (INa), fluoruro sódico (FNa). — Estas tres sales presentan grandes analogías entre sí; además, son muy semejantes al cloruro sódico. Se obtienen disolviendo los óxidos en los ácidos correspondientes. El fluoruro sódico impide el desarrollo de los organismos inferiores a partir de una dosis determinada, característica en cada especie, de tal manera que, bien dosificado, permite la fermentación alcohólica exclusiva y selectiva de un mosto determinado.

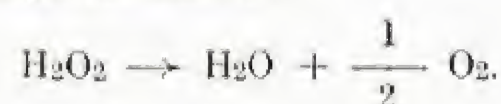
El bromuro y el yoduro se emplean en terapéutica.

Óxidos de sodio. — Se conocen dos: el *óxido sódico* Na_2O, muy inestable, al que corresponde el hidróxido NaOH, y el *peróxido* Na_2O_2. Éste se obtiene por acción del aire sobre el sodio líquido. Se presenta bajo forma de polvo amarillo pálido. Se emplea como oxidante y como medio de blanqueo, pues libera oxígeno por reacción con el agua. Esta reacción tiene lugar en dos fases; en la primera se forma peróxido de hidrógeno:



$$Na_2O_2 + 2H_2O \rightarrow 2NaOH + H_2O_2,$$

que se descompone espontáneamente:



$$H_2O_2 \rightarrow H_2O + \frac{1}{2} O_2.$$

Hidróxido sódico o sosa cáustica (NaOH). — Se puede obtener por acción del agua sobre el óxido Na_2O, o por reacción directa del sodio con el agua. Se prepara industrialmente por el procedimiento de caustificación de la sosa, que consiste en tratar el carbonato sódico disuelto con hidróxido cálcico:



$$CO_3Na_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow CO_3Ca + 2NaOH.$$

La disolución así obtenida se purifica en alcohol.

La sosa se presenta en forma de una masa fibrosa blanca opaca que se disuelve en el agua dando la *lejía de sosa*, muy alcalina, empleada en la fabricación de jabones duros. Es muy cáustica y ataca la piel, disolviéndola.

Las lejías de sosa utilizadas sobre todo en la fabricación de jabones y de pastas químicas de madera para papel se preparan a partir del carbonato sódico Solvay (v. CARBONATO SÓDICO, p. 291). Las demás lejías se obtienen por vía química o electrolítica (v. CLORO, p. 260). Generalmente, la concentración de estas soluciones se expresa en grados Baumé.

Sales oxigenadas. — Las principales sales oxigenadas del sodio son:

El *hipoclorito sódico*, contenido en el agua de Javel (v. METALOIDES, p. 262);

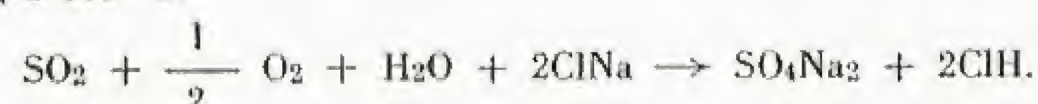
El *clorato sódico* ClO_3Na;

El *sulfito sódico*, SO_3Na_2, $2H_2O$, obtenido neutralizando la solución de bisulfito con una cantidad de carbonato sódico equivalente a la que ha servido para prepararlo, y haciéndole cristalizar;

El *bisulfito sódico* o sulfito ácido de sodio, SO_3HNa, que se obtiene haciendo pasar una corriente de anhídrido sulfuroso sobre carbonato sódico cristalizado.

Sulfato sódico (SO_4Na_2) y sal de Glauber ($SO_4Na_2 \cdot 10H_2O$). — Se obtiene el sulfato anhidro en la descomposición del cloruro sódico por el ácido sulfúrico (primera fase de la preparación del carbonato sódico por el procedimiento Leblanc). En esta reacción se forma ácido clorhídrico como producto secundario.

En el *procedimiento Hargreaves*, se evita la preparación preliminar del ácido sulfúrico provocando la reacción de una mezcla de anhídrido sulfuroso, aire y vapor de agua sobre la sal marina, en aparatos especiales, a 600° C:



$$SO_2 + \frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2ClNa \longrightarrow SO_4Na_2 + 2ClH.$$

Propiedades. — El sulfato anhidro es un polvo blanco cristalino. Por cristalización de la sal disuelta en agua, se forman cristales transparentes de gran tamaño que responden a la fórmula $SO_4Na_2 \cdot 10H_2O$. Los cristales de la sal de Glauber se eflorecen, es decir, pierden agua de cristalización cuando están expuestos al aire. La solubilidad de esta sal, pequeña en frío, aumenta con la temperatura hasta 33° C, y disminuye a continuación.

Si se vierte ácido clorhídrico sobre la sal de Glauber, la solución puede descender a 30° bajo cero (mezcla refrigerante).

Aplicaciones. — Sirve para fabricar carbonato sódico por el procedimiento Leblanc. Se emplea en la preparación del vidrio ordinario. Se utiliza como purgativo en terapéutica.

Tiosulfato sódico ($S_2O_3Na_2$, $5H_2O$). — Se prepara por la acción de una corriente de anhídrido sulfuroso en una lejía de sosa que contenga azufre; se puede obtener igualmente fijando azufre en una solución de sulfito sódico:



$$SO_3Na_2 + S \longrightarrow S_2O_3Na_2.$$

Forma cristales muy estables al aire. Se disuelve bien en el agua, sobre todo en caliente.

Tiene la propiedad de disolver los halogenuros de plata (fijación de las imágenes fotográficas). Se emplea corrientemente en yodometría (v. TIOSULFATOS, p. 271).

Nitrato sódico (NO_3Na). — Forma yacimientos muy importantes en Chile, que se extienden a lo largo de 500 km entre Iquique, Antofagasta y Taltal, a una altitud que oscila entre 500 y 1 300 m. Estos yacimientos constan de una mezcla compleja de varias sales extendidas en capas; la más importante es la del caliche, que contiene de 25 a 30% de nitrato sódico puro. Una vez concentrada, esta sal sirve como abono. Se emplea igualmente para la fabricación de nitrato potásico y ácido nítrico.

El nitrato sódico se disuelve bien en el agua fría; la solubilidad aumenta con la temperatura.

Fosfatos de sodio. — Se conocen numerosos fosfatos de sodio: PO_4Na_3, PO_4H_2Na, PO_4HNa_2, $P_2O_7Na_4$, PO_3Na... El más importante es el de fórmula $PO_4HNa_2 \cdot 12H_2O$, que se obtiene por reacción de la sosa con ácido fosfórico. Se utiliza industrialmente como carga de la seda.

Tetraborato sódico o bórax ($B_4O_7Na_2$). — Se encuentra a veces en las orillas de ciertos lagos salados. Generalmente se prepara por reacción de la sosa con el ácido bórico de Toscana. Fundido, disuelve los óxidos metálicos y da unos flujos de vidrio de colores característicos, por lo que se utiliza para la investigación de los metales (reconocimiento con la perla de bórax en el mechero). Esta propiedad de disolver los óxidos le hace apto para ser empleado en la *soldadura de metales*. Sirve también en las industrias del vidrio y los esmaltes. Es antiséptico.

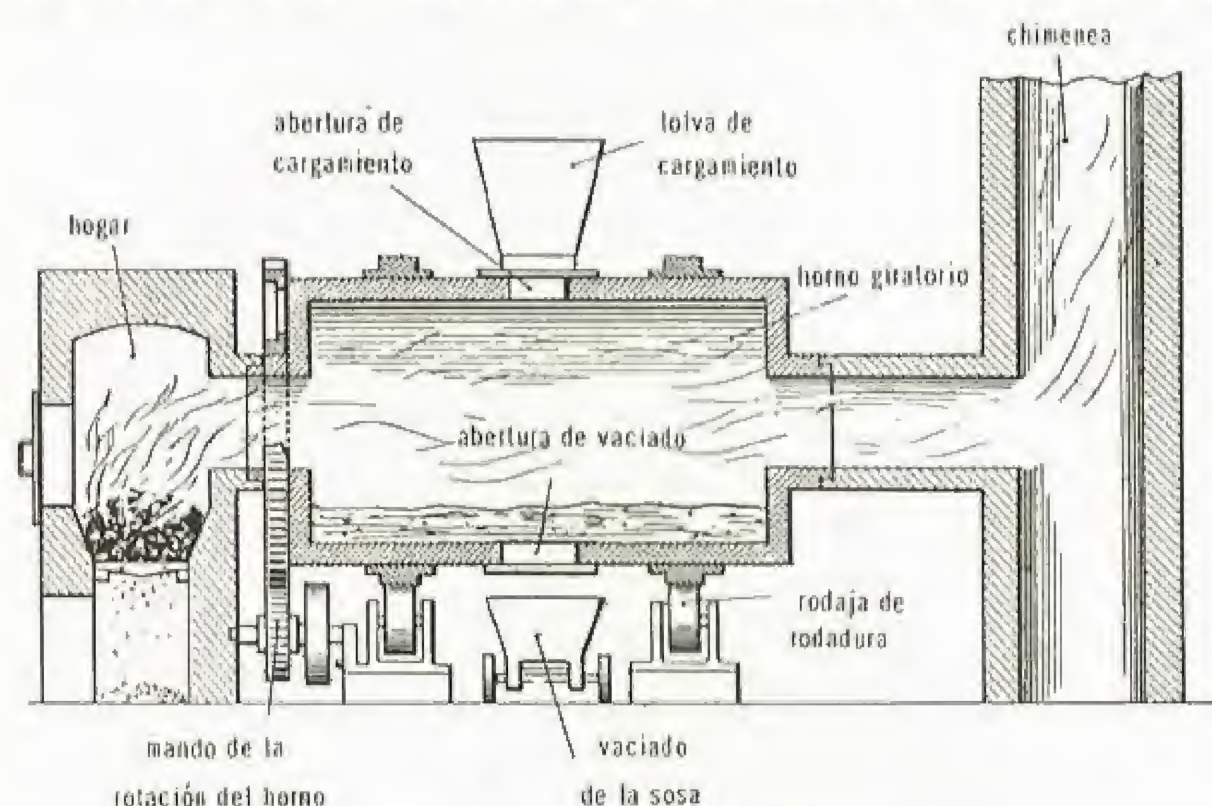


Fig. 25. — Horno giratorio

Carbonato sódico (CO_3Na_2). — Durante mucho tiempo, el carbonato sódico se obtuvo exclusivamente por el procedimiento Leblanc.

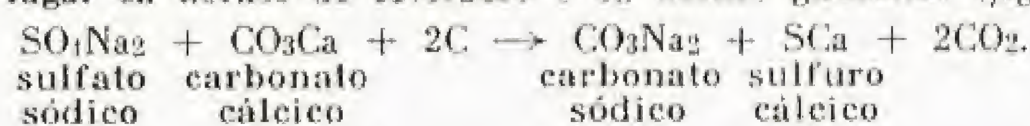
1° *Procedimiento Leblanc.*

En primera fase, se obtiene sulfato sódico a partir de la sal común y el ácido clorhídrico:



$$ClNa + SO_4H_2 \longrightarrow SO_4HNa + ClH;$$
$$SO_4HNa + ClNa \longrightarrow SO_4Na_2 + ClH.$$

El sulfato sódico así obtenido se somete a la acción del carbonato cálcico en presencia de carbón, que obra como reductor. La reacción tiene lugar en hornos de reverbero o en hornos giratorios (*fig.* 25):



$$\underset{\text{sulfato sódico}}{SO_4Na_2} + \underset{\text{carbonato cálcico}}{CO_3Ca} + 2C \longrightarrow \underset{\text{carbonato sódico}}{CO_3Na_2} + \underset{\text{sulfuro cálcico}}{SCa} + 2CO_2.$$

Una vez que se enfría la masa fundida, se lava con una solución alcalina fuerte; el carbonato sódico se disuelve, mientras que el sulfuro cálcico queda en estado sólido, lo que permite separar ambos cuerpos. El carbonato sódico se recupera por evaporación de la solución. Las disoluciones de este tipo se llaman *lejías*, y los residuos, *cernadas*.

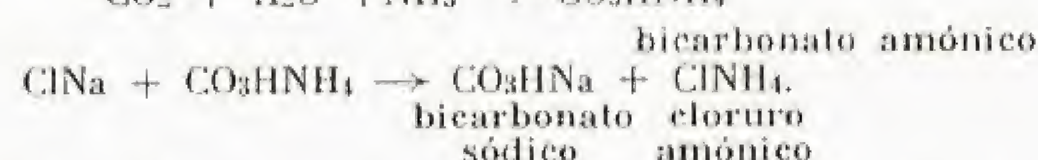
Las cernadas o restos de la sosa sirven para la obtención del azufre.

2° *Procedimiento Solvay (sosa al amoniaco).*

Actualmente se emplea este procedimiento mucho más que el precedente. Se funda en el proceso siguiente: se envía una corriente de anhídrido carbónico a una solución acuosa de cloruro sódico que contiene amoniaco; en primer lugar se forma bicarbonato amónico, el cual, al reaccionar con el cloruro sódico, da bicarbonato sódico y cloruro amónico; el bicarbonato, poco soluble en el agua, se separa, mientras que el cloruro amónico queda disuelto:

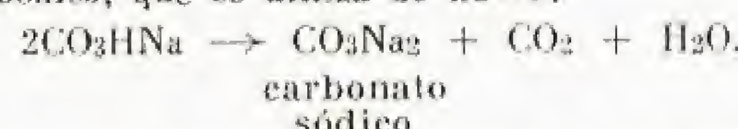


$$CO_2 + H_2O + NH_3 \longrightarrow \underset{\text{bicarbonato amónico}}{CO_3HNH_4}$$



$$ClNa + CO_3HNH_4 \longrightarrow \underset{\text{bicarbonato sódico}}{CO_3HNa} + \underset{\text{cloruro amónico}}{ClNH_4}.$$

La calcinación del bicarbonato sódico así obtenido da carbonato neutro y gas carbónico, que se utiliza de nuevo:



$$2CO_3HNa \longrightarrow \underset{\text{carbonato sódico}}{CO_3Na_2} + CO_2 + H_2O.$$

El carbonato se encuentra en el comercio ya en forma de sosa calcinada CO_3Na_2, ya en forma de sosa cristal $CO_3Na_2 \cdot 10H_2O$. Ésta forma cristales de gran tamaño que, abandonados al aire, se *eflorecen*, pierden 9 moléculas de agua y se transforman en un polvo blanco ($CO_3Na_2 \cdot 1H_2O$). Esta transformación tiene lugar rápidamente en la superficie, y a la larga alcanza el centro de los cristales. El monohidrato pierde el agua de cristalización por calentamiento y pasa a la sal anhidra. Se conoce también un heptahidrato ($CO_3Na_2 \cdot 7H_2O$).

Aplicaciones. — El carbonato sódico tiene numerosas aplicaciones (jabones, vidrios, tintorería, blanqueo).

Bicarbonato sódico (CO_3HNa). — Esta sal se prepara por el procedimiento Solvay, en el que se obtiene directamente, o por reacción del anhídrido carbónico sobre el carbonato neutro:



$$CO_3Na_2 + CO_2 + H_2O \longrightarrow 2CO_3HNa.$$

Es un polvo blanco, cristalino, poco soluble en el agua. Se utiliza para la fabricación de aguas gaseosas y en medicina (neutralización de la acidez gástrica, agua de Vichy).

Silicato sódico (SiO_3Na_2). — Sirve en la industria para el endurecimiento de las piedras.

Sulfuro sódico (SNa_2). — Se obtiene reduciendo el sulfato con carbón a temperatura elevada:



$$SO_4Na_2 + 4C \longrightarrow SNa_2 + 4CO.$$

Cristaliza en solución acuosa, dando una sal de fórmula $SNa_2 \cdot 9H_2O$. El azufre se fija en el sulfuro disuelto en agua, dando polisulfuros.

El sulfhidrato $SHNa$ se forma haciendo pasar una corriente de sulfuro de hidrógeno por una solución de sosa; tiene la propiedad de disolver ciertos sulfuros.

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — Las sales de sodio dan coloración amarilla en la llama del mechero. Se pueden investigar también precipitándolas con hidropiroantimoniato potásico $Sb_2O_7H_2K_2$. La determinación cuantitativa se efectúa en forma de sulfato sódico.

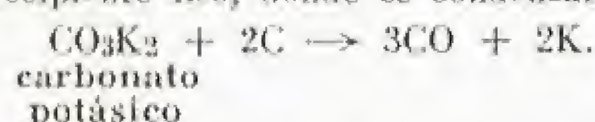
Potasio (K = 39,100) y principales compuestos

Reseña histórica. — El potasio fue descubierto por **Davy** en 1808, al operar con un pedazo de potasa que se había vuelto conductor de la corriente eléctrica por haber permanecido expuesto durante varias horas al aire húmedo. Al colocarlo sobre una hoja de platino conectada al polo negativo de una pila, mientras ponía la cara superior en contacto con un alambre de platino que constituía el polo positivo, observó la aparición de unas esferas minúsculas de un metal muy brillante. Davy propuso para este elemento la denominación de *potasio*. El símbolo K se deriva del nombre *kalium*, con el que también se le conoce en otros países.

Estado natural. — No existe en estado nativo. Sus sales abundan menos que las del sodio. Las más importantes son el cloruro potásico (silvina), el cloruro doble de potasio y magnesio (carnalita), el sulfato doble de potasio y magnesio (schonita) y el cloruro doble de potasio y sodio (silvinita). Todas estas sales se encuentran en yacimientos originados por evaporación de mares internos. Existe igualmente en el agua del mar y, en forma de nitrato, en la superficie de la tierra de los países cálidos. Entra en la composición de numerosos vegetales y ani-

males. Los principales países productores son Estados Unidos y Alemania. España ocupa el quinto lugar (Pirineos y Cataluña).

Preparación. — Gay-Lussac y Thenard lo obtenían por acción del hierro sobre la potasa fundida. Posteriormente, se empleó el procedimiento Brunner, que consistía esencialmente en calentar una mezcla de carbón y carbonato potásico en una botella de hierro en la que se adaptaba un recipiente liso, donde se condensaba el potasio:



$$CO_3K_2 + 2C \longrightarrow 3CO + 2K.$$

carbonato potásico

Este método ha caído mucho en desuso; actualmente se prepara el potasio casi exclusivamente por electrólisis, a partir del hidróxido potásico.

Propiedades físicas y químicas. — Es un sólido blanco, de brillo metálico que se empaña al aire; es quebradizo a 6° C, blando a 15° C, y funde a 62,5° C. Es más ligero que el agua: D = 0,865. No se oxida en frío. Descompone el agua con gran energía, desprendiendo hidrógeno que se inflama en el aire; al mismo tiempo, se forma potasa KOH. Es más activo que el cloro. Se conserva en aceite de nafta a fin de impedir que se ponga en contacto con el aire, que siempre contiene agua. Su interés práctico es muy reducido, pues, generalmente, el sodio —que es más barato— puede reemplazarlo en las reacciones químicas.

Cloruro potásico (ClK). — Se encuentra en estado natural ya solo (silvina), ya asociado al cloruro de magnesio (carnalita), al cloruro sódico (silvinita) y al sulfato de magnesio (kainita). Se extrae de las aguas madres de la salinas o de la carnalita por concentración de las soluciones que lo contienen. Se presenta en forma de cristales cúbicos, anhidros, de densidad 1,996 y de sabor salado.

Se emplea para la fabricación del carbonato potásico y la potasa cáustica, y, en general, para la preparación de todas las sales de potasio.

Bromuro potásico (BrK). — Se obtiene ya por acción del bromo sobre la potasa y ulterior calcinación para descomponer el bromato formado, ya por reacción del carbonato potásico con el bromuro de hierro:



$$4CO_3K_2 + FeBr_2,\ 2FeBr_3 \longrightarrow 8BrK + Fe_3O_4 + 4CO_2.$$

Se presenta en forma de cubos incoloros de sabor salado y picante, muy solubles en el agua. Se emplea en medicina como sedante del sistema nervioso. Sirve también para la preparación de películas fotográficas.

Yoduro potásico (IK). — Se presenta formando cubos de sabor acre y salado, solubles en el agua. Se prepara de manera análoga al bromuro, a partir del yoduro de hierro. Sirve en medicina como fundente, contra la escrófula y el bocio. Se emplea en el laboratorio para efectuar valoraciones yodométricas.

Fluoruro potásico (FK). — Se obtiene reduciendo la potasa con ácido fluorhídrico. Añadiendo una cantidad de ácido fluorhídrico igual a la que ha servido para prepararlo, se forma el fluorhidrato potásico F_2HK, que cristaliza fácilmente.

Hidróxido potásico o potasa cáustica (KOH). — El protóxido de potasio reacciona con el agua y da hidróxido potásico KOH, o potasa cáustica. Generalmente se prepara por caustificación del carbonato potásico con cal apagada:



$$CO_3K_2 + Ca(OH)_2 \longrightarrow 2KOH + CO_3Ca.$$

Actualmente se obtiene también por electrólisis del cloruro potásico. El hidróxido se purifica por solución en el alcohol (potasa al alcohol). En general se cuela en forma de barras y se expende así en el comercio. Funde fácilmente por el calor. Es muy delicuescente; al mismo tiempo que absorbe la humedad del aire, fija el anhídrido carbónico de éste, dando carbonato potásico. Se disuelve bien en el agua, con gran producción de calor. De todas las bases empleadas corrientemente, es la más fuerte. La potasa cáustica destruye rápidamente la piel. Se emplea para desecar gases y en la fabricación de jabones blandos.

Carbonato potásico (CO_3K_2). — El carbonato potásico o potasa del comercio, CO_3K_2, se prepara de diferentes maneras: por lixiviación de las cenizas de vegetales terrestres, ya de las salinas de remolachas, ya del churre de la lana, ya por el procedimiento Leblanc.

La sal obtenida por el procedimiento Leblanc (v. CARBONATO SÓDICO, p. 291) es impura.

El procedimiento Solvay es inaplicable, porque el bicarbonato potásico es más soluble que el de sodio. Se modifica reemplazando la salmuera amoniacal por una solución de trimetilamina $N(CH_3)_3$:



$$N(CH_3)_3 + CO_2 + H_2O \longrightarrow CO_3HNH(CH_3)_3$$
$$CO_3HNH(CH_3)_3 + ClK \longrightarrow CO_3HK + ClHN(CH_3)_3.$$

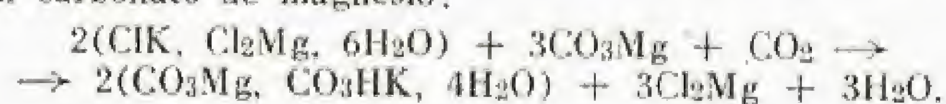
El cloruro de trimetilamina se descompone por la cal, libera la trimetilamina, y el ciclo empieza de nuevo:



$$2ClHN(CH_3)_3 + Ca(OH)_2 \longrightarrow Cl_2Ca + 2N(CH_3)_3 + 2H_2O.$$

Es un polvo granulado, delicuescente, soluble en el agua, insoluble en el alcohol. Sirve para preparar la potasa cáustica, el agua de Javel, los vidrios y los cristales.

Preparación industrial. Procedimiento de Stassfurt. — Se envía una corriente de anhídrido carbónico a una solución de carnalita cargada con carbonato de magnesio:



$$2(ClK,\ Cl_2Mg,\ 6H_2O) + 3CO_3Mg + CO_2 \longrightarrow$$
$$\longrightarrow 2(CO_3Mg,\ CO_3HK,\ 4H_2O) + 3Cl_2Mg + 3H_2O.$$

Esta sal se descompone por el calor:



$$2(CO_3Mg,\ CO_3HK,\ 4H_2O) \longrightarrow CO_3K_2 + 2CO_3Mg + 9H_2O + CO_2.$$

Cenizas de los vegetales. — Las cenizas de los vegetales dan lugar a una explotación industrial por incineración de ciertas plantas de poco valor (helechos, retamas), de tallos de plantas de cultivo (maíz, patatas, colza, etc.), e incluso de árboles en las regiones forestales de América, Suecia y Rusia. Una vez disueltas, filtradas y evaporadas, las cenizas dejan un residuo salino equivalente al 10 % del peso primitivo, que contiene 90 % de sales de potasio: carbonato, sulfato, cloruro. La potasa procedente de esta extracción se utiliza en las fábricas de jabón.

Churre de la lana. — En las aguas de lavado de la lana, se recuperan los licores alcalinos procedentes del tratamiento del churre. Estos licores contienen 80 % de CO_3K_2, lo que representa de 80 a 85 kilogramos por tonelada de vellón empleado.

Melazas de la remolacha. — Por incineración y lixiviación, las melazas, producto secundario de la industria azucarera, constituyen la materia de base para la obtención de una potasa comercial.

Lejías de potasa. — Se preparan en las fábricas de jabón por caustificación de una solución de carbonato (12° Bé) a la temperatura de ebullición:



$$CO_3K_2 + Ca(OH)_2 \longrightarrow CO_3Ca + 2KOH,$$

o por vía electrolítica (v. HIDRÓXIDO SÓDICO O SOSA CÁUSTICA, p. 290).

Clorato potásico (ClO_3K). — Se prepara haciendo pasar una corriente de cloro por una solución concentrada y caliente de lejía potásica:



$$Cl_2 + 2KOH \longrightarrow ClK + ClOK + H_2O,$$
$$3ClOK \longrightarrow ClO_3K + 2ClK;$$

el hipoclorito que se forma al principio se desdobla por el calor en cloruro y clorato potásico (v. METALOIDES, p. 262). Se presenta bajo forma de escamas incoloras que funden a 350° C y se descomponen a temperatura un poco superior, dando cloruro potásico y liberando oxígeno. Es muy poco soluble.

Se emplea en pirotecnia y en medicina. Absorbido por el organismo, se elimina en parte por las glándulas salivares.

Sulfito potásico. — Se obtiene de igual manera que la sal correspondiente de sodio.

Sulfato potásico (SO_4K_2). — Se forma por reacción del ácido sulfúrico con el cloruro potásico. Constituye grandes cristales, muy estables, y se disuelve bien en el agua. Sirve como abono.

Bisulfato potásico o sulfato ácido de potasio (SO_4HK). — Se obtiene mezclando sulfato potásico y ácido sulfúrico, en cantidades equivalentes. Por el calor se transforma en pirosulfato $S_2O_7K_2$.

Nitrato potásico (NO_3K). — Llamado también *nitro* y *salitre*, existe en estado natural en ciertos países. Se obtiene por doble descomposición entre el nitrato de Chile y el cloruro potásico:

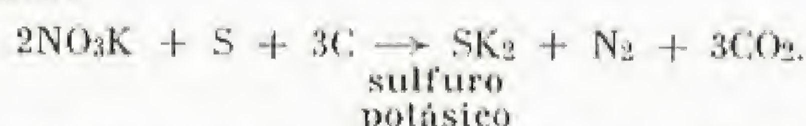


$$NO_3Na + ClK \longrightarrow NO_3K + ClNa.$$

Tiene sabor fresco y picante. Su solubilidad en el agua aumenta con la temperatura.

Es un comburente enérgico, por lo que sirve para la fabricación de la pólvora negra, constituida por una mezcla de carbón, azufre y salitre.

La deflagración de la pólvora puede representarse aproximadamente por la ecuación:



$$2NO_3K + S + 3C \longrightarrow SK_2 + N_2 + 3CO_2.$$

sulfuro potásico

Existen ortofosfatos, tri, di y monopotásicos; un pirofosfato $P_2O_7K_4$ y un metafosfato PO_3K.

Arseniato potásico. — Se obtiene por acción del ácido arsénico sobre el carbonato potásico (medicina: licor de Fowler). Con las sales de cobre, da precipitados de color verde.

El arseniato potásico es muy venenoso.

Cianuro potásico (CNK). — Se origina cuando se calientan las substancias orgánicas que contienen a la vez nitrógeno y potasio. Se emplea para la extracción del oro. Es un veneno muy violento.

Oxalato potásico. — De los diferentes oxalatos, el más empleado es la sal de acederas C_2O_4HK. Tiene una gran avidez por el oxígeno y sirve como quitamanchas.

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — Las sales de potasio dan coloración azul rojiza en la llama del mechero. El cloroplatinato potásico ($Cl_6Pt)K_2$, amarillo, sirve para su investigación e igualmente para su determinación cuantitativa.

Rubidio

Rb = 85,48

El rubidio (*rubidius*, rojo obscuro) fue descubierto mediante análisis espectral por **Bunsen** y **Kirchhoff** en las aguas madres del agua mineral de Durkheim. Este elemento se halla al lado del potasio en las sales de escombreras; ciertas plantas, como el tabaco, lo absorben del suelo.

Se prepara por acción del magnesio sobre el hidróxido de rubidio. Es un metal blanco de plata, blando como la cera, muy oxidable. De

sus sales, se conocen, principalmente, el cloruro ClRb, el bromuro y el yoduro, que cristalizan en cubos. La mayor parte de estas sales tienen propiedades análogas a las correspondientes del potasio. El carbonato neutro, CO_3Rb_2, es muy cáustico.

Las sales de rubidio encuentran un empleo limitadísimo, por lo que no se preparan industrialmente.

Cesio

Cs = 132,91

El cesio (*caesius*, azul celeste) fue hallado por **Bunsen** y **Kirchhoff** al mismo tiempo que el rubidio, en 1861. Acompaña al potasio en las sales de escombreras; además forma un mineral, el *pollux*, muy poco abundante. Se puede obtener por electrólisis del cianuro. Es un metal de color blanco de plata, dúctil, muy blando, que se descompone por el agua, inflamándose. Es el más activo de todos los metales alcalinos; arde espontáneamente al contacto del aire. Las sales de cesio se conducen de manera análoga a las del rubidio. Se utiliza el cesio para fabricar ciertos tipos de células fotoeléctricas.

Reconocimiento del rubidio y el cesio. — Estos dos elementos se reconocen generalmente por análisis espectral.

Litio

Li = 6,940

El litio (*lithos*, piedra) se encuentra en la naturaleza principalmente en forma de silicato (lepidolita) y de fosfato (ambligonita). El metal fue descubierto en 1817 por **Davy**, que lo obtuvo por descomposición del óxido. Posteriormente, **Bunsen** y **Troost** estudiaron sus propiedades.

Actualmente se obtiene el elemento descomponiendo por la corriente eléctrica el cloruro de litio fundido.

Es un metal sólido, dúctil, con brillo de plata. Es el más ligero de todos los metales: D = 0,53, y el de mayor calor específico. Es relativamente estable.

Las propiedades de sus sales son intermedias entre las de los metales alcalinos y las de los alcalinotérreos.

El litio se emplea en la industria de la energía atómica (preparación del tritio de la bomba atómica).

Hidróxido de litio (LiOH). — El hidróxido de litio es una base fuerte, de carácter alcalino. Por calentamiento al rojo blanco, pierde agua y se transforma en óxido Li_2O.

Cloruro de litio. — A diferencia de los demás cloruros alcalinos, éste cristaliza con agua (ClLi, $2H_2O$) y no existe nativo en la naturaleza.

Carbonato de litio (CO_3Li_2). — Es mucho menos soluble que los otros carbonatos alcalinos, por lo que se emparenta con las sales correspondientes de los alcalinotérreos.

Aplicaciones. — Las sales de litio se emplean en medicina contra los cálculos y la gota, y para solubilizar el ácido úrico.

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — Es muy característica la coloración roja que el litio confiere a la llama del mechero. Se investiga también por espectroscopia. La determinación cuantitativa se realiza gravimétricamente con el sulfato.

Amonio

Según la teoría de Ampère, las sales amónicas se conducen como si encerrasen un radical monoatómico: el *amonio*, NH_4, comparable a un metal alcalino. La mayor parte de sus sales son isomorfas con las sales potásicas correspondientes.

El calor descompone estas sales, desprendiendo gas amoniaco si el ácido es fijo, o una mezcla del ácido y amoniaco si se trata de un ácido débil.

El amonio no existe libre; sin embargo, forma una amalgama análoga a la del sodio y el potasio.

Fuente de los productos amoniacales. — El amoniaco y, en general, un gran número de sales amoniacales se originan cuando se descomponen por el calor las substancias orgánicas nitrogenadas o cuando estas materias sufren la putrefacción.

La principal fuente de productos amoniacales actualmente explotada la constituyen las aguas de condensación del gas de alumbrado.

Sales amoniacales. — Generalmente se preparan haciendo pasar una corriente de amoniaco por el ácido correspondiente.

Las más importantes son las siguientes.

Cloruro amónico ($ClNH_4$). — Llamado también *sal amoniaco*, se obtiene por reacción de una lechada de cal con las aguas amoniacales procedentes de la putrefacción de la orina o del lavado del gas de alumbrado, lo que provoca el desprendimiento del amoniaco, que se recoge en ácido clorhídrico. Se origina también como producto secundario en la obtención del carbonato sódico por el procedimiento Solvay.

Se presenta en forma de polvo cristalino, blanco, estable al aire. Se sublima por el calor, y al condensarse forma unas masas fibrosas translúcidas y ligeramente amarillentas.

Se disuelve en el agua, provocando un descenso de la temperatura. Calentado por encima del rojo, se volatiliza sin fundir. A temperaturas más elevadas se disocia en NH_3 y ClH. Da lugar a cloruros dobles. Se emplea para decapar los metales (soldadura), en medicina, y para la obtención del amoniaco. Mezclado con otras sales, sirve como abono.

Otros halogenuros. — Existen un *bromuro*, un *yoduro* y un *fluoruro*; éste se emplea en el análisis de los silicatos y para grabar el vidrio.

Clorato amónico (ClO_3NH_4). — Sirve como oxidante en la preparación del negro de anilina. Es poco soluble. Se obtiene saturando el ácido clórico con amoniaco.

Sulfato amónico [$SO_4(NH_4)_2$]. — Utilizado para la preparación del alumbre amoniacal y de ciertos abonos.

Nitrato amónico (NO_3NH_4). — Se forma tratando el ácido nítrico con amoniaco. Es un comburente enérgico, por lo que se utiliza para la fabricación de explosivos. Se disuelve muy bien en el agua con absorción de calor, de manera que sirve para preparar mezclas refrigerantes.

Fosfatos. — Existen varios fosfatos amónicos. El más conocido es el *fosfato doble de amonio y sodio*, PO_4HNaNH_4, o sal de fósforo, empleado en análisis.

Carbonato amónico [$CO_3(NH_4)_2$]. — Se prepara sublimando una mezcla de carbonato cálcico y cloruro amónico. La sal que se encuentra en el comercio es una mezcla de carbonato, bicarbonato y carbamato amónicos.

Sulfuros. — Se conocen varios: el *monosulfuro*, $S(NH_4)_2$, el *sulfhidrato*, $SHNH_4$, y polisulfuros.

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — Las sales amónicas se descomponen por el calor en medio alcalino, liberando el amoniaco que contienen. El reconocimiento y la dosificación de éste se realizan como ya se indicó anteriormente (v. AMONIACO, p. 274).

Metales alcalinotérreos

Magnesio y principales compuestos: Reseña histórica. Estado natural. Preparación. Propiedades. Cloruro de magnesio (Cl_2Mg, $6H_2O$). óxido de magnesio (magnesia, MgO). Sulfato de magnesio (sal amarga, SO_4Mg). Fosfato amónico-magnésico. Carbonato de magnesio (CO_3Mg). Reconocimiento y determinación cuantitativa. — **Calcio y principales compuestos:** Reseña histórica. Estado natural. Preparación. Propiedades. Cloruro de calcio (Cl_2Ca). óxido de calcio (cal viva, CaO). Hidróxido de calcio [cal apagada, $Ca(OH)_2$]. Cementos y morteros. Hormigón armado, cemento armado. Puzolanas. Hipoclorito de calcio [$(ClO)_2Ca$]. Sulfito de calcio (SO_3Ca). Sulfato de calcio (SO_4Ca, $2H_2O$). Nitrato de calcio [$(NO_3)_2Ca$, $4H_2O$]. Fosfatos de calcio. Carbonato de calcio (CO_3Ca). Propiedades. Sulfuro de calcio (SCa). Hidruro de calcio (CaH_2). Nitruro de calcio (N_2Ca_3). Carburo de calcio (C_2Ca). Cianamida de calcio. (CN_2Ca). Reconocimiento y determinación cuantitativa. — **Estroncio y principales compuestos:** Reseña histórica. Estado natural. Preparación. Propiedades. Principales compuestos. Reconocimiento. — **Bario y principales compuestos:** Reseña histórica. Estado natural. Preparación. Propiedades. Principales compuestos. Acción fisiológica. Reconocimiento y determinación cuantitativa. — **Radio:** Reseña histórica. Estado natural. Preparación. Propiedades químicas del radio y de sus sales. — **Berilio o glucinio y principales compuestos:** Reseña histórica y estado natural. Preparación y propiedades. Principales compuestos. Reconocimiento

Se conocen con el nombre de metales alcalinotérreos los seis elementos que forman el grupo II *a* del sistema periódico, a saber: el *berilio*, el *magnesio*, el *calcio*, el *estroncio*, el *bario* y el *radio*.

Son bivalentes. Se les llama alcalinotérreos a causa del aspecto térreo de sus óxidos, y, como su nombre indica, manifiestan propiedades intermedias entre los metales alcalinos y los térreos, siendo el magnesio y, sobre todo, el berilio, los que más se asemejan a éstos. No existen en estado natural, pues son demasiado activos. Generalmente se presentan formando silicatos, carbonatos, cloruros y sulfatos. Los hidróxidos son menos cáusticos que los álcalis. Los metales son difíciles de obtener, por lo que su empleo es muy restringido. Descomponen el agua en frío, dando un hidróxido básico y desprendiendo hidrógeno al mismo tiempo: $Ca + 2H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + H_2$. Sus óxidos son menos solubles en el agua que los álcalis. Los carbonatos y los fosfatos son insolubles. Los sulfatos son poco o nada solubles. En cambio, los cloruros, bromuros, yoduros y nitratos se disuelven fácilmente.

Los óxidos se reducen por el carbono solamente a la temperatura del horno eléctrico. Esta reducción no da lugar a la obtención del metal, sino a la del carburo correspondiente (el más importante es el carburo cálcico, C_2Ca), que con el agua da acetileno.

Las sales correspondientes de los metales de este grupo son isomorfas. Merecen citarse de manera especial dos casos de isomorfismo: el de los carbonatos y el de los sulfatos.

Los compuestos volátiles y los que se descomponen por el calor comunican a la llama del mechero Bunsen coloraciones características; así:

el calcio da una coloración amarilla rojiza;
el estroncio da una coloración roja;
el bario da una coloración verde amarillenta.

Magnesio y principales compuestos

Reseña histórica. — El óxido de magnesio se conocía ya a principios del siglo XVIII con el nombre de *magnesia alba*. **Davy** obtuvo el metal un siglo más tarde, por reducción de esta sal con potasio, y lo llamó *magnesio*.

Estado natural. — Se encuentra muy abundante formando minerales: sulfatos procedentes de depósitos lacustres (*kieserita, epsomita*), carbonatos (*magnesita, dolomita*), silicatos (*olivino, esteatita, talco, espuma de mar, asbesto*); las sales de escombreras contienen varias sales de magnesio (*carnalita, bischofita*).

Preparación. — Durante mucho tiempo, se ha obtenido por acción del sodio al rojo sobre el cloruro de magnesio en un crisol de hierro:



$$2Na + Cl_2Mg \rightarrow 2Clna + Mg.$$

Actualmente, este método ha caído en desuso.

2° Se descompone la magnesita calentándola con carbón en corriente de cloro:



$$CO_3Mg \rightarrow MgO + CO_2$$
$$MgO + Cl_2 + C \rightarrow MgCl_2 + CO,$$

y se electroliza el cloruro fundido así obtenido.

3° Por electrólisis del agua del mar. Este método, reciente, es objeto de una industria muy activa en EE. UU. y Canadá, países ricos en energía hidroeléctrica.

Propiedades. — El magnesio tiene un brillo análogo al de la plata. Es ligero: D = 1,75. Funde hacia 630° C y destila a una temperatura un poco superior a 1 000° C. Se puede reducir a hojas; como es muy poco tenaz, para estirarlo en forma de alambre hay que comprimirlo enérgicamente en un molde de acero calentado a la temperatura de fusión del metal; este molde lleva un agujero por el que se escapa la masa fundida, que se solidifica inmediatamente. Si se calienta a temperatura más elevada, arde con llama muy viva, rica en radiaciones fotogénicas, por lo que se emplea para la toma de fotografías: se produce óxido de magnesio (magnesia, MgO). Arde también en el vapor de agua, óxido de carbono, anhídrido carbónico, cloro, bromo, yodo y azufre. Activado por el yodo, da lugar a combinaciones orgánicas (compuestos de Grignard).

Se disuelve en los ácidos diluidos; reduce el anhídrido bórico y la sílice.

Además de las aplicaciones fotográficas ya citadas, sirve como reductor enérgico. Forma aleaciones.

Cloruro de magnesio (Cl_2Mg, $6H_2O$). — Se encuentra en las aguas madres de las salinas. Se prepara saturando el carbonato con ácido clorhídrico en caliente. El agua de cristalización no se evapora al calentar la sal, sino que ocurre la reacción:



$$Cl_2Mg.\ 6H_2O, \rightarrow MgO + 2ClH + 5H_2O.$$

Esta reacción explica el ataque de las paredes de las calderas de vapor por el ácido clorhídrico cuando se emplea agua que contiene cloruro de magnesio (por ejemplo, el agua del mar). Se le puede obtener anhidro calentándolo con cloruro amónico; éste tiene una gran avidez por el agua, por lo que se conserva en frascos cerrados herméticamente. Se une con otros cloruros, dando sales dobles.

Óxido de magnesio (magnesia, MgO). — Es el único óxido del magnesio. Forma un polvo blanco, ligero: D = 3,07; se prepara por combustión del metal o por calcinación del hidróxido o del carbonato de magnesio.

El hidróxido magnésico se obtiene tratando una sal de magnesio con sosa o con potasa.

Es muy poco soluble en el agua; una parte se disuelve en 5 000 partes de agua. Funde solamente en el horno eléctrico.

Ligeramente calcinada, la magnesia da con el agua una masa blanca, compacta, muy dura. En esto radica la ventaja de las construcciones hidráulicas realizadas con cal preparada a partir de las dolomitas (carbonato de calcio y magnesio).

Sulfato de magnesio (sal amarga, SO_4Mg). — Se encuentra en el agua del mar y en ciertas aguas minerales (Pullna), y como mineral en la kieserita y en la epsomita.

Se presenta en forma de agujas que contienen 7 moléculas de agua. Tiene sabor amargo, y se emplea como purgante. El sulfato de magnesio forma sulfatos dobles con los sulfatos de potasio y de amonio, por ejemplo: SO_4Mg, SO_4K_2, $6H_2O$, *isomorfos*. Se conoce una serie muy larga de sulfatos dobles isomorfos cuyas fórmulas difieren de la precedente solamente por el hecho de que el magnesio está reemplazado por los metales siguientes: cinc, hierro, manganeso, cromo, níquel, cobalto.

Fosfato amónico-magnésico. — Los fosfatos de magnesio no tienen interés. Si se añade un fosfato alcalino a una sal de magnesio en solución amoniacal y se agita, se forma a la larga un precipitado cristalino, $PO_4Mg(NH_4)$, $6H_2O$, muy poco soluble en el agua.

Carbonato de magnesio (CO_3Mg). — Este carbonato existe en estado natural (*giobertita*), cristalizado como el carbonato cálcico. Unido al carbonato cálcico, forma un mineral natural muy abundante, la *dolomita*.

Es un polvo blanco, que se descompone por el calor liberando anhídrido carbónico y formando óxido de magnesio. Lo atacan bien los ácidos.

Si se vierte una disolución de un carbonato alcalino en una solución de una sal de magnesio, se obtiene un precipitado gelatinoso constituido por una mezcla de carbonato e hidróxido magnésicos, $3CO_3Mg$, $Mg(OH)_2$, $3H_2O$. Desecado, este precipitado se transforma en un polvo blanco muy ligero (magnesia alba), utilizado para la confección de polvos de tocador y de productos dentífricos.

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — Estas dos operaciones se pueden efectuar precipitando el metal en forma de fosfato amónico-magnésico (formación de copos). Por evaporación, esta sal pasa a pirofosfato, que se pesa.

Calcio y principales compuestos

Reseña histórica. — Los compuestos de calcio se utilizan desde tiempos remotos (morteros). El metal fue descubierto por **Davy** (1808), que lo aisló electrolizando el cloruro cálcico.

Estado natural. — Sus minerales son muy abundantes en la naturaleza en forma de carbonatos (*calcita, aragonito, mármol*), sulfatos (*yeso, anhidrita*), fosfatos, silicatos... Existe en el reino animal (huesos, caparazones...).

Preparación. — Se obtiene por electrólisis de una mezcla de cloruro y fluoruro de calcio a 600° C.

Propiedades. — Es un metal de color amarillo pálido, que se empaña al contacto del aire húmedo. Ligero (D = 1,7). Arde en el oxígeno al rojo. Arde también en una atmósfera de nitrógeno dando el nitruro N_2Ca_3, que descompone el agua formando cal y amoníaco. Se disuelve en los ácidos clorhídrico y sulfúrico diluidos, desprendiendo hidrógeno.

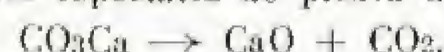
Con el plomo da una aleación muy dura, empleada como metal de cojinetes.

Cloruro de calcio (Cl_2 Ca). — Se prepara disolviendo la creta en ácido clorhídrico. Se presenta en forma de cristales muy delicuescentes. La sal anhidra o fundida sirve como agente deshidratante. Es muy soluble en el agua; su disolución en el agua (100 partes de agua pueden disolver 1 500 partes de cloruro) provoca un descenso de la temperatura que puede ir de 0° C a — 45° C. Es soluble en el alcohol absoluto. El cloruro cálcico hidratado (Cl_2Ca, $6H_2O$) cristalizado puede transformarse en anhidro por calentamiento a 200° C. El cloruro cálcico desecado a 700° C puede colarse en placas (cloruro cálcico fundido).

El *bromuro*, Br_2Ca, y el *yoduro* I_2Ca, son análogos.

El *fluoruro*, F_2Ca, es insoluble en el agua. Existe en la naturaleza cristalizado (*espatoflúor* o *fluorita*).

Óxido de calcio (cal viva, CaO). — Se prepara calcinando el carbonato, el hidróxido o el nitrato. Para la obtención industrial, se calcina la caliza en hornos especiales de piedra de sillería (caleras):



$$CO_3Ca \rightarrow CaO + CO_2.$$

Es un polvo blanco difícilmente fusible, poco estable al aire, pues fija con gran energía el agua y el anhídrido carbónico de ésta.

Hidróxido de calcio [cal apagada, $Ca(OH)_2$]. — Se obtiene cuando se somete la cal viva a la acción del agua; primeramente se forma una pasta blanca que posteriormente se transforma en un polvo blanco (cal apagada). Esta reacción produce gran desprendimiento de calor.

La cal es poco soluble en el agua (agua de cal); la solución tiene reacción alcalina; se emplea en forma de suspensión, llamada lechada de cal.

La cal tiene muchas aplicaciones. Sirve para la fabricación de morteros y de bujías; en la industria de curtidos, se utiliza para depilar las pieles.

Cementos y morteros. — Los morteros son mezclas de cal y arena o guijo utilizadas para aglomerar las piedras en las construcciones; la arena sirve para evitar que el mortero se contraiga durante el fraguado, que tiene lugar por efecto del gas carbónico contenido en el aire: la cal se transforma en carbonato cálcico; tal es el caso de los *morteros aéreos*, inestables en medio acuoso.

Los *morteros hidráulicos* se obtienen calcinando mezclas de calizas y arcillas naturales o artificiales en la proporción de 40 partes de arcilla por 100 de cal. Parte del calcio se encuentra en estado de silicato y de aluminato. Los morteros hidráulicos fraguan en el seno del agua y se endurecen al cabo de cierto tiempo.

Los *cementos* son unos productos artificiales que, amasados con agua, fraguan al aire o en el agua. El cemento romano, obtenido por combustión de margas calizas ricas en arcilla, fragua al cabo de unos cuantos minutos. Más importante es el cemento Portland, que se obtiene calcinando una mezcla de 45 a 65 partes de arcilla por 100 de cal. En esta operación se desprenden agua y anhídrido carbónico y se forma una masa sólida, el *klinker*, que se pulveriza finamente. Este cemento comienza a endurecer al cabo de varias horas. A partir de las

escorias de los altos hornos, se preparan los *cementos llamados de escoria.*
La mezcla de cemento con guijo constituye el *hormigón.*

Hormigón armado, cemento armado. — El hierro tiene la propiedad de poseer el mismo coeficiente de dilatación que el cemento. Por lo tanto, si se introducen varillas de hierro en la masa de cemento o de hormigón, una vez fraguado éste el bloque resultante tendrá mayor solidez, y no se producirán fenómenos de dislocación por efecto de las variaciones de la temperatura. El cemento y el hormigón armados se emplean mucho en la construcción.

Puzolanas. — Las *puzolanas* son unas arcillas porosas, de origen volcánico, que se encuentran en los alrededores de Puzol (Italia) y que, ligeramente calcinadas y mezcladas con cales grasas, dan lugar a materias hidráulicas de calidad excelente.

Hipoclorito de calcio [(ClO)$_2$Ca]. — Se obtiene cristalizado, $(ClO)_2Ca, 4H_2O$, por reacción del hipoclorito sódico con el cloruro de calcio; cuando pierde el agua de cristalización, se presenta en forma de polvo blanco, inestable al aire. Se emplea como desinfectante.
Más importancia que el hipoclorito tiene el producto comercial llamado *cloruro de cal*, que es una mezcla de cal, CaO, e hipoclorito; se emplea como desinfectante. Lo atacan incluso los ácidos débiles, con desprendimiento de cloro. Se prepara haciendo pasar una corriente de cloro sobre cal apagada:



$$2Ca(OH)_2 + 2Cl_2 \longrightarrow (ClO)_2Ca + Cl_2Ca + 2H_2O.$$

Sulfito de calcio (SO$_3$Ca). — Se emplea para la conservación de la cerveza.
El bisulfito, $(SO_3H)_2Ca$, sirve en la industria papelera, pues disuelve la lignina de la madera.

Sulfato de calcio (SO$_4$Ca,2H$_2$O). — Se encuentra con abundancia (yacimientos de yeso) formando grandes cristales monoclínicos, a veces de tipo gemelo de macla en forma de flecha.
El sulfato casi anhidro (yeso en polvo) se obtiene *calentando* el yeso hidratado en unos hornos especiales; como combustible se emplea madera; el fuego ataca directamente el yeso que forma bóvedas por encima; sobre estos bloques, se amontonan fragmentos cada vez más pequeños de yeso hidratado. Una vez deshidratado, se le pulveriza.
Amasado con agua, se solidifica poco a poco, porque el sulfato anhidro recupera el agua de cristalización.
Se emplea para moldear objetos y para la preparación de suelos, tabiques y techos.
El sulfato cálcico es poco soluble en el agua. Las aguas naturales que contienen sulfato cálcico disuelto se llaman selenitosas. Estas aguas son nocivas para la salud cuando encierran más de 0,2 gramos de sulfato por litro.

Nitrato de calcio [(NO$_3$)$_2$Ca, 4H$_2$O]. — Es una sal delicuescente, muy soluble en el agua y soluble en el alcohol. Las eflorescencias blancas que se forman en las paredes húmedas contienen nitrato cálcico. Se llama también *nitro de Noruega*, por ser empleado en este país como abono.

Fosfatos de calcio. — El ácido ortofosfórico forma con el calcio tres combinaciones principales.
El fosfato tricálcico, $(PO_4)_2Ca_3$, constituye el ochenta por ciento de las cenizas de los huesos. Existe con gran profusión en la naturaleza, especialmente en forma de *apatito* y *fosforita*. Es importante la explotación del guano, originado por los excrementos de ciertas aves depositados en las rocas calcáreas. En este producto, los nitratos acompañan a los fosfatos en muchos casos.
Se emplea como abono. Sin embargo, las plantas lo absorben lentamente, por lo que se somete generalmente a un tratamiento preliminar, que consiste en atacar el fosfato con ácido sulfúrico; se forma así una mezcla de mono y bifosfato cálcicos con sulfato cálcico, que se utiliza corrientemente en agricultura con el nombre de *superfosfato*.
La *retrogradación* de los superfosfatos ocurre porque, con el transcurso del tiempo, se puede volver a formar *fosfato bicálcico*, $(PO_4)_2H_2Ca_2$, que, al contrario de lo que sucede con los otros fosfatos, no es asimilado por las plantas.

Carbonato de calcio (CO$_3$Ca). — Muy abundante en la naturaleza, se presenta en masas compactas más o menos puras (piedras de construcción, piedra de cal, creta, mármol). Todas las variedades naturales de carbonato cálcico reciben el nombre de *calizas*.
El carbonato cálcico natural forma diferentes cristales: romboedros (*espato doble de Islandia, calcita*) prismas rómbicos (*aragonito*); los cristales de espato de Islandia, muy puros, a veces de gran tamaño, provocan la *doble refracción* de los rayos luminosos. Esta propiedad, mucho más marcada que en los cristales de cualquier otro cuerpo, hace que se utilicen en gran número de instrumentos de óptica.

Propiedades. — Insoluble en el agua pura, se disuelve ligeramente en las aguas que contienen anhídrido carbónico disuelto (formación de *estalactitas* y de *estalagmitas*).
Por el calor, se descompone en cal y en anhídrido carbónico:



$$CO_3Ca \longrightarrow CaO + CO_2.$$

Lo atacan los ácidos, con efervescencia debida a la producción de anhídrido carbónico.
Las aguas que contienen bicarbonato cálcico, llamadas *aguas duras*, producen incrustaciones en las calderas y son poco aptas para el lavado (no dan espuma con el jabón). Por esto, cuando han de ser utilizadas para estos fines, conviene ablandarlas (precipitación del carbonato por ebullición, filtración a través de filtros de permutita).

Sulfuro de calcio (SCa). — Se obtiene por calcinación de la cal en una corriente de sulfuro de hidrógeno. Se forma como subproducto en la preparación del carbonato sódico por el procedimiento Leblanc.
Es fosforescente, por lo que se emplea para la fabricación de pinturas luminosas.

Hidruro de calcio (CaH$_2$). — Se forma por calentamiento del calcio metálico. Con el nombre de *hidrolita*, se emplea para obtener hidrógeno, por reacción con agua:



$$CaH_2 + 2H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2 + 2H_2.$$

Nitruro de calcio (N$_2$Ca$_3$). — Se obtiene calentando el calcio en una corriente de nitrógeno. La reacción es exotérmica. De color gris claro cuando es puro, reacciona con el agua caliente, dando hidróxido cálcico y amoniaco.

Carburo de calcio (C$_2$Ca). — Este compuesto tiene una importancia considerable en la industria (alumbrado, síntesis del alcohol, síntesis del ácido acético). Se obtiene calentando una mezcla de cal y carbón en el horno eléctrico:



$$CaO + 3C \longrightarrow C_2Ca + CO.$$

Tratado con agua, desprende acetileno:



$$C_2Ca + 2H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2 + C_2H_2;$$

el acetileno originado en esta reacción tiene un olor aliáceo muy desagradable. Se debe este olor a las impurezas formadas al mismo tiempo que el carburo en el horno eléctrico: fosfuros de silicio y de calcio, que se descomponen por el agua, desprendiendo gases de olor repulsivo. El acetileno puro tiene olor empireumático muy tenue.
El carburo cálcico se presenta en forma de agujas cristalinas blancas. El producto industrial es gris a causa de las impurezas que lo acompañan.

Cianamida de calcio (CN$_2$Ca). — Se forma por reacción del nitrógeno sobre el carburo cálcico a temperatura elevada:



$$C_2Ca + N_2 \longrightarrow CN_2Ca + C.$$

Generalmente se utiliza como producto industrial la mezcla de cianamida y carbón resultante de la reacción. La cianamida pura es blanca, pulverulenta, mientras que el producto industrial es negro.
La cianamida industrial sirve como abono; reacciona con el agua del suelo dando amoniaco:



$$CN_2Ca + 3H_2O \longrightarrow CO_3Ca + 2NH_3.$$

Se emplea también para la obtención del cianuro sódico.

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — En ausencia de otras sales, los compuestos de calcio tiñen de color amarillo rojizo la llama del mechero Bunsen. Se determinan con mayor precisión en el espectroscopio. Generalmente, la dosificación se efectúa con oxalato amónico; por calcinación, se pasa del oxalato cálcico al óxido de calcio, que se pesa.

Estroncio (Sr = 87,63) y principales compuestos

Reseña histórica. — El estroncio fue aislado por **Davy** en 1808, en la electrólisis de la estroncianita (CO_3Sr).

Estado natural. — Es un elemento escaso. Acompaña a veces al calcio en los minerales de éste. De sus compuestos naturales, los más importantes son el sulfato (*celestina*) y el carbonato (*estroncianita*).

Preparación. Propiedades. — Se prepara por electrólisis del cloruro o por reducción del óxido en caliente, con aluminio. Es de color amarillo un poco más pronunciado que el calcio, y brillante. Es ligero (D = 2,4), dúctil y maleable. Arde en el aire y descompone el agua.

Principales compuestos. — El *óxido*, SrO, obtenido por descomposición del nitrato, es una materia grisácea, porosa, que reacciona con el agua dando el hidróxido, $Sr(OH)_2$; éste se emplea en vez de la cal para la extracción del azúcar de remolacha.
El *cloruro*, $Cl_2Sr, 6H_2O$, y el *yoduro*, I_2Sr, se obtienen disolviendo el óxido de estroncio en los ácidos clorhídrico y yodhídrico.
El *sulfato de estroncio*, SO_4Sr, que se encuentra en la naturaleza formando prismas de color azul (*celestina*), sirve para preparar las demás combinaciones del estroncio; como es prácticamente insoluble, hay que reducirlo primeramente con carbón a fin de obtener el sulfuro:



$$SO_4Sr + 2C \longrightarrow SSr + 2CO_2.$$

El *nitrato de estroncio*, $(NO_3)_2Sr$, se emplea en pirotecnia a causa de la hermosa coloración roja que produce al arder. Para preparar las bengalas rojas, se mezclan 40 partes de nitrato de estroncio, 13 de flor de azufre, 10 de clorato potásico y 4 de oxisulfuro de antimonio.
El *carbonato de estroncio*, CO_3Sr, es isomorfo del aragonito (CO_3Ca). Es insoluble. Se descompone a temperatura elevada, dando óxido SrO.

Reconocimiento. — Las sales de estroncio dan color rojo carmín en la llama; se le reconoce bien en el espectro.

Bario (Ba = 137,36) y principales compuestos

Reseña histórica. — El bario (del griego, *barus*, pesado), fue extraído de la barita en 1808 por **Davy** y **Seebeck,** siguiendo el mismo proceso que para el potasio y el sodio.

Estado natural. — Se encuentra como sulfato (*espato pesado*) y como carbonato (*witerita*) en la naturaleza. Es poco abundante.

Preparación. Propiedades. — Se obtiene electrolizando el cloruro; el metal se deposita en el cátodo de mercurio, con el que se amalgama; a continuación, se separa por destilación.

Es un metal blanco de plata, muy blando. Es muy oxidable al aire, en el que arde con llama verde; descompone el agua y funde a 85° C. Es más pesado que los anteriores (D = 3,75).

Principales compuestos. — El *cloruro de bario*, Cl_2Ba, $2H_2O$, se prepara disolviendo el carbonato de bario en ácido clorhídrico. Forma cristales rómbicos, solubles en agua. A temperatura elevada, pierde el agua de cristalización.

El *óxido de bario* (barita, BaO) se obtiene por calcinación del nitrato al rojo claro. Forma una masa blanca, utilizada como deshidratante.

El *hidróxido de bario*, $Ba(OH)_2$, se forma por reacción del óxido con el agua; prácticamente, se prepara por disolución del sulfuro de bario en agua. Se emplea para la preparación del azúcar. En solución acuosa, constituye el *agua de barita*.

El *peróxido de bario*, BaO_2, del que se conocen varios hidratos, se forma calentando el óxido de bario en una atmósfera de aire, o por acción del agua oxigenada sobre la barita. Al calentarlo al rojo pierde oxígeno y regenera el óxido de bario; este proceso se puede repetir indefinidamente, lo que permite extraer el oxígeno del aire (Boussingault).

El *sulfato de bario*, SO_4Ba, existe en la naturaleza (*espato pesado*) y constituye el principal mineral de este elemento. Se puede preparar por acción de un sulfato soluble sobre el cloruro de bario. Es un precipitado blanco, completamente insoluble en el agua, utilizado en análisis para la dosificación del bario y del ácido sulfúrico. Se emplea en pintura (blanco fijo) y en la industria del papel, para dar color blanco y conferir peso a la pasta. Sirve como materia prima para la obtención de sulfuro de bario.

El *nitrato de bario*, $(NO_3)_2Ba$, se prepara tratando el sulfuro de bario por el ácido nítrico; se emplea en pirotecnia, para obtener fuegos artificiales verdes.

El *carbonato de bario*, CO_3Ba, se presenta en estado natural (*witerita*); se obtiene como subproducto en las azucareras.

El *sulfuro de bario*, SBa, se forma en la reducción del sulfato con carbón a temperatura elevada:



$$SO_4Ba + 4C \longrightarrow SBa + 4CO.$$

Esta reacción es importante, pues constituye el punto de partida para la obtención de numerosas sales de bario. El sulfuro de bario es un polvo blanco, que sirve principalmente para la preparación de litopón (mezcla de sulfuro de bario y sulfuro de cinc).

El *carburo de bario*, C_2Ba, obtenido en el horno eléctrico por calcinación del carbonato con carbón, se conduce de manera muy semejante al carburo de calcio.

Acción fisiológica. — Las sales de bario son *muy venenosas*. Sus efectos tóxicos están en parte atenuados por el hecho de que varios de sus compuestos son muy poco solubles. Se emplean sobre todo en radiografía.

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — Las sales de bario dan color verde en la llama del mechero Bunsen. Es también muy sensible la reacción de precipitación de sulfato de bario, utilizada para la identificación y dosificación de este elemento.

Radio

Ra = 226,05

Reseña histórica. — El radio, elemento raro de la serie alcalinotérrea, derivado del uranio por desintegración atómica, se encuentra en los minerales de uranio, en donde fue descubierto y aislado por el matrimonio **Curie** (1898).

Estado natural. — En los minerales antiguos en que se ha establecido el estado de régimen entre la desintegración del uranio y la de sus productos, cada tonelada de uranio corresponde a 0,3 gramos de radio; esta proporción pasa a ser menor en los minerales secundarios. En la práctica, los minerales de radio más importantes son:

1° La autunita de Portugal (fosfato);

2° La carnotita de América (vanadato);

3° La pechblenda (óxido salino de uranio, al que acompañan óxido de plomo y de las tierras raras, óxidos de torio, cerio, etc.).

Preparación. — La parte esencial del tratamiento consiste en la preparación final del radio y el bario por cristalización fraccionada de los cloruros. Esta operación es muy laboriosa y muy larga. La extracción del radio conoce un auge creciente en el mundo, a causa del desarrollo que adquiere la industria de la energía atómica.

Propiedades químicas del radio y de sus sales. — El radio se conduce químicamente de manera muy parecida al bario; es más inestable que éste.

Los halogenuros se disuelven bien en el agua; el sulfato es insoluble.

La propiedad más característica del radio es la de desdoblarse constante y espontáneamente en *emanación*, llamada *radón*, gas químicamente inerte perteneciente a la familia de los gases nobles, y en átomos de helio cargados de electricidad positiva, expulsados con gran velocidad (partículas α). En esta descomposición se originan también rayos β y γ.

Todos los efectos que resume el término *radiactividad* son la consecuencias directa de este desdoblamiento espontáneo y de la proyección de las radiaciones α, β y γ.

Pero, durante esta manifestación, que afecta solamente a una fracción muy pequeña del radio, el resto se conduce como si fuera un cuerpo ordinario desde el punto de vista químico.

El efecto radiactivo es muy variado: destruye las células de los tejidos vivos, ioniza el aire, va acompañado de autoluminiscencia y provoca gran desprendimiento de calor.

Generalmente, se mide la intensidad de los cuerpos radiactivos por la ionización que provocan en el aire. La unidad utilizada es el curie.

El radio metálico fue aislado por electrólisis en 1910 (Debierne). Las sales de radio tiñen de rojo la llama del mechero.

Berilio o glucinio (Be = 9,013) y principales compuestos

Reseña histórica y estado natural. — En la Antigüedad se conocía ya el berilio (del griego *berullos*, origen del brillo). **Vauquelin** aisló el óxido en 1798; **Woehler** obtuvo el metal en 1828, reduciendo el cloruro de berilio con potasio. En varios países se le llama *glucinio* (Gl).

El principal mineral de este elemento es el *berilo*, $6SiO_2$, Al_2O_3, 3BeO, piedra preciosa que cristaliza en el sistema hexagonal; el Brasil encabeza la lista de los países productores.

Preparación y propiedades. — Se obtiene electrolizando una mezcla de fluoruro de berilio y bario. Es un metal blanco, maleable, ligero (D = 2,1), que no descompone el agua; se disuelve en los ácidos diluidos y se combina con el cloro y con el yodo en caliente.

Con el cobre forma aleaciones, llamadas *bronces de berilio*, utilizadas para la fabricación de muelles y hélices. Actualmente se emplea en la industria atómica, como generador de neutrones.

Principales compuestos. — *Cloruro de berilio*, Cl_2Be, formado por agujas incoloras delicuescentes.

Óxido de berilio, BeO, extraído de la esmeralda (berilo), $6SiO_2$, Al_2O_3, 3BeO; es un polvo blanco amorfo.

Hidróxido de berilio, $Be(OH)_2$, preparado por precipitación de una sal de berilio con amoniaco; insoluble en el agua, se disuelve en las bases fuertes, dando berilatos, y también en los ácidos, siendo por lo tanto anfótero.

El *sulfato* y el *nitrato de berilio* son solubles en el agua; las soluciones tienen carácter ácido. El *carbonato* es insoluble.

Reconocimiento. — Se le caracteriza por el precipitado cristalino de fosfato amonicoberílico.

Metales térreos

Aluminio y principales compuestos: Reseña histórica. Estado natural. Fabricación. Propiedades. Acción del oxígeno. Acción de los ácidos. Cloruro de aluminio (Cl_3Al). Fluoruro de aluminio (F_3Al). Fluoruro doble de aluminio y sodio (F_3Al, 3FNa). Óxido de aluminio (alúmina, Al_2O_3). Hidróxido de aluminio [$Al(OH)_3$]. Sulfato de aluminio [$(SO_4)_3Al_2$, $18H_2O$]. Alumbres: Alumbre de aluminio potásico [$(SO_4)_3$ Al_2, SO_4K_2, $24H_2O$]. Aplicaciones. Nitruro de aluminio (NAl). Carburo de aluminio (C_3Al_4). Silicatos. Reconocimiento y determinación cuantitativa. — **Tierras raras o escasas:** Tierras de la cerita. Tierras de la itria. — **Cerio:** Reseña histórica. Propiedades. Aplicaciones. Reconocimiento y determinación cuantitativa de las tierras escasas. — **Actinio**

La serie de metales térreos comprende los elementos que siguen al boro en el grupo III *a* del sistema periódico. La basicidad de estos elementos, menor que la de las alcalinotérreos, aumenta con el peso atómico creciente; así, el boro y el aluminio forman boratos y aluminatos, mientras que los demás metales de la serie constituyen el catión de las sales. El boro ha sido ya estudiado en los metaloides.

Como norma general, son trivalentes. El aluminio posee tres electrones en la capa exterior; generalmente, los demás metales térreos tienen solamente dos, pero la capa inmediatamente próxima cuenta con nueve y cede uno, pasando así a la estructura estable de octete.

Aluminio (Al = 26,98) y principales compuestos

Reseña histórica. — Este metal recibe su nombre del alumbre, conocido desde tiempo inmemorial. Fue obtenido por **Woehler** en 1828,

quien lo aisló tratando el cloruro de aluminio con potasio, gracias a los trabajos de **Sainte-Claire Deville**, se pudo preparar más tarde a escala industrial.

Estado natural. — Es uno de los elementos más abundantes en la naturaleza. No existe en ésta nativo. Su mineral más importante es la *bauxita*, Al_2O_3, $2H_2O$; los yacimientos de Guayana producen aproximadamente la mitad de la cantidad total extraída en el mundo entero. Existe también con profusión como silicato (*feldespato, mica, hornblenda, arcilla, caolín*). De los demás minerales, citaremos los sulfatos (*alumbres*), el óxido (*corindón*) y el fluoruro de aluminio y de sodio (*criolita*, F_3Al, $3FNa$). Los vegetales no lo absorben.

Fabricación. — V. METALURGIA, p. 355.

Propiedades. — Es un metal blanco azulado, fácil de pulir. Es el más ligero de todos los metales usuales (D = 2,56). Es dúctil y maleable; se puede reducir a hojas muy finas como el oro y la plata y estirar hasta formar alambres finos. Sonoro. Después de la plata y el cobre es el mejor conductor de la electricidad y del calor. Posee una gran capacidad calorífica. Funde a 650° C.

A pesar del ataque lento que sufre por parte de los ácidos orgánicos, se puede emplear para fabricar utensilios de cocina, pues sus sales están desprovistas de toda toxicidad. Forma numerosas aleaciones: con el cobre, *bronces de aluminio;* con el magnesio, *metal electrón;* con el magnesio, cobre y manganeso, el *duraluminio.*

Acción del oxígeno. — A pesar de su avidez por el oxígeno, aparentemente es inalterable al aire; en realidad, se forma una capa muy fina de óxido (alúmina) que protege las capas subyacentes contra toda oxidación ulterior, y ésta es la razón de que el metal pierda el brillo metálico.

Acción de los ácidos. — Los ácidos sulfúrico y nítrico lo atacan con gran dificultad en frío; en cambio, la reacción tiene lugar en caliente. El ácido clorhídrico actúa sobre el aluminio enérgicamente.

Las soluciones alcalinas disuelven bien el aluminio desprendiendo hidrógeno y formando el aluminato correspondiente (la alúmina tiene carácter anfótero).

Cloruro de aluminio (Cl_3Al). — Durante mucho tiempo se ha preparado por acción del cloro seco sobre una mezcla íntima de alúmina y carbón:



$$Al_2O_3 + 3C + 3Cl_2 \rightarrow 3CO + 2Cl_3Al.$$

Actualmente, se obtiene cada vez más por reacción del clorhídrico gaseoso sobre el aluminio:



$$2Al + 6ClH \rightarrow 2Cl_3Al + 3H_2.$$

Es una masa cristalina incolora, que funde hacia 200° C; a menudo está coloreado de amarillo a causa de las impurezas de sales de hierro que lo acompañan. Es soluble en el alcohol y en el éter. Es fumante al aire, del que absorbe la humedad para dar un hidrato Cl_3Al, $6H_2O$. Se emplea como agente de síntesis de compuestos orgánicos (Friedel y Craft).

Fluoruro de aluminio (F_3Al). — Se obtiene por evaporación de la solución del aluminio en el ácido fluorhídrico; se presenta en forma de romboedros límpidos, insolubles en el agua, insensibles a la acción del ácido sulfúrico.

Fluoruro doble de aluminio y sodio (F_3Al, $3FNa$). — Existe en estado natural (*criolita*) en Groenlandia; su bajo punto de fusión hace que se emplee como fundente y en la metalurgia del aluminio.

Óxido de aluminio (alúmina, Al_2O_3). — Se halla en la naturaleza en estado anhidro y cristalino, generalmente coloreado por diversas impurezas.

Considerado como piedra preciosa, es muy duro.

Las variedades más importantes son:

El corindón, incoloro, más o menos puro;
El rubí oriental, rojo, coloreado por el cromo;
El zafiro, azul, coloreado por el cobalto;
La amatista oriental, violeta, coloreada por el manganeso;
La esmeralda oriental, amarillo verdosa.
El esmeril es una mezcla de alúmina y óxido de hierro.

El óxido de aluminio se forma oxidando el metal en una corriente de oxígeno o por deshidratación del hidróxido $Al(OH)_3$. El óxido obtenido artificialmente es un polvo blanco, insoluble en el agua, soluble en los álcalis fundidos. Por fusión del óxido amorfo, se obtiene en forma cristalizada (piedras preciosas artificiales).

Hidróxido de aluminio [$Al(OH)_3$]. — Se prepara descomponiendo un aluminato alcalino por el agua:



$$AlO_3Na_2 + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 3NaOH.$$

Se forma también precipitando en frío o en caliente una sal de aluminio con potasa. Por cualquiera de estos métodos, se obtiene un precipitado blanco, gelatinoso, insoluble en el agua. Este compuesto es anfótero, es decir, tiene tanto propiedades ácidas como básicas; además, es coloidal. Se saca partido de estas propiedades para el *mordentado* de los colorantes; se impregna la fibra con la substancia mordiente y se sumerge en un baño decolorante orgánico, con lo que se forma sobre la fibra una sal metálica compleja estable (laca). Así, si se hace hervir una solución de cochinilla con carbonato sódico, y se añade luego sulfato de aluminio o alumbre disueltos, precipita el hidróxido coloreado de rojo, mientras que el líquido permanece incoloro.

Sulfato de aluminio [$(SO_4)_3Al_2$, $18H_2O$]. — Se halla en la naturaleza. Se prepara tratando con ácido sulfúrico la alúmina gelatinosa extraída de la bauxita o de las arcillas poco ferruginosas (caolín), después de haberlas calcinado para insolubilizar el óxido de hierro que contienen. Se opera a 100° C o a 150° C y se concentra la solución decantada hasta obtener la cristalización en escamas blancas. El sulfato de aluminio se disuelve muy bien en el agua.

Se emplea como mordiente en tintorería, para el encolado del papel y en la obtención de alumbres.

Alumbres. — Los alumbres constituyen una clase importante de sales dobles cristalizadas en octaedros regulares, que pueden cristalizar y subsistir en todas las proporciones en un mismo cristal (isomorfismo).

Alumbre de aluminio potásico [$(SO_4)_3Al_2$, SO_4K_2, $24H_2O$]. — Se puede obtener por adición de una solución concentrada y caliente de sulfato potásico sobre una solución de sulfato de aluminio. El alumbre cristaliza por enfriamiento.

También se puede preparar (alumbre romano) calcinando ligeramente la *alunita*, mineral que se encuentra en los alrededores de Roma: $3Al_2O_3$, K_2O, $4SO_3$, $6H_2O$, y recuperándolo por tratamiento con agua, que disuelve el alumbre y deja un precipitado de alúmina insoluble.

Cristaliza en octaedros voluminosos y límpidos; su densidad es 1,9.

La solubilidad del alumbre aumenta con la temperatura: 100 partes de agua disuelven 3,9 de alumbre a 0° C; 9,5 a 10° C; 15,1 a 20° C; 44,1 a 50° C; 357,5 a 100° C. A 92° C funde en su propia agua de cristalización, y pierde a 100° las 24 moléculas de agua. A temperatura más elevada, se hincha y forma una masa esponjosa de alumbre calcinado. Este alumbre se disuelve lentamente en el agua. Se descompone al rojo, y queda como residuo alúmina y sulfato potásico.

Aplicaciones. — El alumbre tiene numerosas aplicaciones. Sirve como mordiente de toda clase de fibras. Vuelve las pieles imputrescibles (curtidurías). Endurece la gelatina (propiedad empleada en fotografía). Agente antiséptico y astringente en medicina.

La fórmula general de los alumbres es:



$$SO_4M_2\ (SO_4)_3X_2,\ 24H_2O.$$

M puede ser uno de los metales o radical siguientes: potasio, amonio, rubidio, cesio, talio, plata;

X puede ser uno de los metales siguientes: aluminio, hierro, cromo, gadolinio (metal de las tierras raras).

Además, el ácido selénico puede reemplazar al ácido sulfúrico.

Los alumbres de los metales alcalinos son incoloros. El de hierro es rosa, y el de cromo, violeta.

Nitruro de aluminio (NAl). — Se forma calentando aluminio en una atmósfera de nitrógeno; es un polvo blanco que reacciona con el agua dando amoniaco e hidróxido de aluminio:



$$NAl + 3H_2O \rightarrow NH_3 + Al(OH)_3.$$

Carburo de aluminio (C_3Al_4). — Tratando el óxido de aluminio con carbón en el horno eléctrico, se obtiene carburo de aluminio en forma de cristales blancos. Lo descompone el agua, produciendo metano.

Silicatos. — La descripción de estos compuestos es del dominio de la mineralogía; las arcillas y los caolines son silicatos de alúmina hidratados. La tierra de arcilla contiene de 5 a 6% de carbonato o de silicato de calcio; las margas son mezclas de arcilla y caliza; los feldespatos son silicatos dobles de aluminio, de potasio o de sodio (v. CERÁMICA, p. 349 y VIDRIO, p. 346).

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — Fundiendo una sal de aluminio con otra de cobalto, se obtiene una masa azul característica de $(CoO_4)Al_2$. Para la dosificación se pasa al hidróxido y de éste, por calcinación, al óxido, que se pesa.

Tierras raras o escasas

Reciben esta denominación los *lantánidos*, serie de elementos cuyo número atómico se extiende de 57 a 71, y los metales *escandio* e *itrio* que los acompañan en la naturaleza. Todos ellos son trivalentes (el cerio, el terbio y el praseodimio pueden funcionar, además como tetravalentes, y el samario, el europio y el iterbio, como bivalentes). El hecho, curioso, de que una serie consecutiva de elementos tenga la misma valencia, como es el caso de los lantánidos, se explica por su estructura atómica: dos electrones en la capa exterior y nueve en la subyacente; ésta pierde uno, y adquiere la configuración estable.

Las sales de las tierras raras tienen la propiedad de precipitarse en forma de oxalatos cristalinos en soluciones ácidas. Los óxidos son básicos, y las sales isomorfas, lo que explica la dificultad que ofrecen cuando se intenta separarlos.

Los primeros elementos de este grupo han sido descubiertos hacia 1800. Entre otros muchos investigadores que han estudiado las tierras raras, citaremos a **Berzelius, Gadolin, Mosander, Holm, Lecoq de Boisbaudran** y **Cleve.**

Para su estudio, se puede optar por la clasificación establecida por Berzelius.

Tierras de la cerita

	SÍMBOLO	PESO ATÓMICO	COLOR DE LAS SALES
Lantano	La	138,92	incoloras
Cerio	Ce	140,13	ceriosas = incoloras céricas = anaranjadas
Praseodimio ...	Pr	140,92	verdes
Neodimio	Nd	144,27	violáceas
Samario	Sm	150,43	amarillas

Tierras de la itria

	SÍMBOLO	PESO ATÓMICO	COLOR DE LAS SALES
Escandio	Sc	44,96	incoloras
Itrio	Y	88,92	incoloras
Europio	Eu	152	—
Gadolinio	Gd	156,9	—
Terbio	Tb	158,93	—
Disprosio	Dy	162,46	—
Holmio...	Ho	164,94	—
Erbio	Er	167,2	rosa obscuro
Tulio	Tm	168,94	incoloras
Iterbio	Yb	173,04	—
Lutecio...	Lu	174,99	—

Esta división se basa principalmente en la diferencia de solubilidad de los sulfatos dobles de las dos series, diferencia que es solamente aproximada.

El elemento de número atómico 61, al que se denomina indistintamente *ilinio* o *promecio* (Il o Pm), parece haber sido descubierto recientemente. En algunos países se llama *casiopeo* (Cp) al lutecio.

Los principales minerales de las tierras raras son:

La *monacita*, fosfato complejo de cerio y lantano, muy abundante en el Brasil (Bahía, Espírito Santo), materia prima de la industria del alumbrado por incandescencia (v. TORIO).

La *cerita*, silicato complejo de cerio, calcio y hierro.

La *gadolinita* y *el xenotim*, de los que se extraen las tierras de la itria.

Para la obtención de los metales, no sirve la reducción del óxido con carbón, sino que hay que efectuar la electrólisis de los cloruros anhidros.

La separación de las tierras raras se efectúa por cristalización fraccionada. Los óxidos son fluorescentes. Los compuestos más solubles son los sulfatos, los cloruros y los nitratos; los carbonatos son muy insolubles.

Las tierras raras dan espectros de absorción y de emisión, en general muy característicos.

Nos limitaremos a describir el cerio, que es el elemento más importante de esta serie.

Cerio (Ce = 140,13)

Reseña histórica. — El cerio fue descubierto en 1809, por **Berzelius** e **Hisinger**, en la cerita. En 1839, **Mosander** reconoció en este mineral la existencia de dos nuevas bases, muy parecidas al óxido de cerio: los óxidos de lantano y de didimio (el didimio comprende los elementos neodimio y praseodimio, muy difíciles de separar).

Propiedades. — Es el más abundante en las tierras raras. Forma dos óxidos, a partir de los cuales se pueden obtener sales trivalentes, incoloras, y tetravalentes, anaranjadas. Estas últimas sirven en las determinaciones cuantitativas de oxidación-reducción.

El *cerio metálico* ha sido aislado por Smithmann (e igualmente el lantano, el praseodimio, el neodimio y el samario) por electrólisis del cloruro anhidro Cl_3Ce.

Es un cuerpo gris, de densidad 7,1; funde a 620° C. Puede fijar hidrógeno cuando se calienta a 400° C, dando un hidruro, CeH_2, cuerpo negro que se inflama espontáneamente al aire. Descompone el agua en frío. Forma un carburo, C_2Ce, parecido al carburo cálcico.

Aplicaciones. — La dosis óptima de cerio en el manguito de incandescencia es de 1% de CeO_2 contra el 99% de óxido de torio, para obtener la máxima intensidad luminosa.

El *ferrocerio* de las piedras de los encendedores de bolsillo es una aleación de hierro y cerio, en la que este elemento está en la proporción de 35%. La utilización de estas *piedras* se funda en las propiedades pirofóricas del metal, que se puede recuperar de los residuos de la extracción del torio

Las tierras raras se emplean en la industria de la energía atómica (radiactividad artificial).

Reconocimiento y determinación cuantitativa de las tierras escasas. — Generalmente se efectúan por espectrofotometría.

Actinio (Ac = 227)

Se incluye en la familia del aluminio porque, como éste, pertenece al grupo III *a* del sistema periódico. Es radiactivo; se forma en la desintegración del uranio. Todos los esfuerzos realizados hasta la fecha para aislarlo han resultado vanos; sin embargo, se conocen sus sales: el *cloruro*, el *nitrato*, el *carbonato*, el *sulfato* y el *fosfato*.

Metales del grupo IV a

Titanio y compuestos: Historia y estado general. Preparación y propiedades. Principales compuestos. Reconocimiento y determinación cuantitativa. — **Circonio y compuestos:** Historia y estado natural. Preparación y propiedades. Principales compuestos. — **Hafnio y compuestos.** — **Torio y compuestos:** Principales compuestos

Son cuatro: el *titanio*, el *circonio*, el *hafnio*, y el *torio*. Tienen muchas propiedades comunes con las tierras raras.

Titanio (Ti = 47,90) y compuestos

Historia y estado natural.— Fue aislado por **Berzelius,** en 1825, por reducción del fluoruro de titanio; existe en la naturaleza preferentemente como *ilmenita* y *rutilo* (Estados Unidos, India, Brasil).

Preparación y propiedades. — El *titanio* se obtiene con dificultad, reduciendo el cloruro fundido con un metal alcalino; tiene aspecto metálico, es quebradizo en frío y maleable en caliente.

D = 4,50. Funde a una temperatura del orden de 1 800° C. Resiste a los ácidos; el agua regia lo ataca.

Desde hace poco tiempo, se le empieza a emplear industrialmente en los Estados Unidos (mejora de funciones y aceros, pirotecnia, fabricación de vidrios y porcelanas, lámparas de arco).

Principales compuestos. — El *tetracloruro de titanio*, Cl_4Ti, es un líquido incoloro, que hierve a 136° C. Manifiesta gran avidez por el agua; expuesto al aire, desprende abundantes vapores blancos de hidróxido de titanio, por lo que se emplea para producir nubes artificiales: es uno de los cuerpos más fumígenos que se conocen.

El *dióxido de titanio*, TiO_2, existe nativo en el rutilo y en la anatasa. El óxido artificial, obtenido por precipitación, se emplea como pigmento blanco en pintura *(blanco de titanio)*.

El titanio puede formar también sales trivalentes *(cloruro, sulfato)*, que obran como reductoras.

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — La solución acuosa de sales titánicas se vuelve amarilla cuando se vierte sobre ella agua oxigenada; en esta solución se puede dosificar el titanio por calorimetría.

Circonio (Zr = 91,22) y compuestos

Historia y estado natural. — El *circonio* fue aislado del circón por **Klaproth** en 1789. Sus minerales son bastante escasos; el más importante es el *circón*, SiO_2, ZrO_2, que se encuentra sobre todo en Australia, Estados Unidos y Brasil.

Preparación y propiedades. — Al igual que en el caso del titanio, hay que vencer grandes dificultades para obtener el metal; sus aplicaciones son muy restringidas (lámparas especiales). Se presenta en forma de polvo negro metálico, cuyo punto de fusión es muy próximo a 1 500° C; es bastante estable al aire seco, y arde en cuanto se le calienta. Los ácidos sulfúrico y nítrico no lo atacan; se disuelve en el ácido fluorhídrico y en el agua regia.

Principales compuestos. — La *tierra de circonio*, ZrO_2, se encuentra a veces nativa en la naturaleza; es un polvo blanco difícilmente fusible; los ácidos la atacan con dificultad. Este óxido es el compuesto de circonio que encuentra las principales aplicaciones: lapiceros de Nernst, ladrillos refractarios, vidrios, pinturas.

Se conocen además, principalmente el *cloruro* y el *fluoruro de circonio*, polvos cristalinos, y el *sulfato*.

Hafnio (Hf = 178,6) y compuestos

Descubierto por **Hevesy** y **De Coster** en los minerales de circonio. Elemento muy similar al circonio, se separa difícilmente de él, por cristalización fraccionada. No encuentra aplicaciones prácticas. El *óxido de hafnio* es más básico que el de anhídrido carbónico. El *sulfato* es muy estable.

Torio (Th = 232,05) y compuestos

Descubierto por **Berzelius** en 1828, el *torio* se extrae de la *monacita*, fosfato complejo de tierras raras. Se obtiene por electrólisis del tetracloruro de torio, en forma de agujas cristalinas. Es bastante pesado (D = 11,2), estable al aire; el ácido nítrico lo ataca difícilmente; en cambio, se disuelve en el ácido clorhídrico.

Es el primer término de una serie radiactiva.

Principales compuestos. — El *tetracloruro de torio*, Cl_4Th, cristaliza en agujas que se disuelven bien en el agua. El *óxido*, ThO_2, se forma en la calcinación de las sales volátiles; es un polvo blanco muy estable.

Las *sales de torio* se reconocen por el precipitado característico de subfosfato P_2O_6Th, $11H_2O$ que se obtiene con el subfosfato ácido de sodio.

Metales del grupo V a

Vanadio y compuestos: Reseña histórica. Estado natural. Preparación y propiedades. Principales compuestos. Aplicaciones del vanadio. — **Niobio o colombio y compuestos:** Reseña histórica. Estado natural y propiedades. Niobio metálico. Principales compuestos. — **Tántalo y compuestos:** Reseña histórica. Estado natural. Preparación y propiedades. Principales compuestos. — **Protactinio y compuestos**

Por regla general, los metales de este grupo funcionan como pentavalentes; sin embargo, el vanadio puede formar compuestos en los que manifiesta las valencias siete, cinco, cuatro, tres y dos. Los cuatro elementos de la serie entran principalmente en el anión de las sales, pues sus óxidos se conducen como anhídridos de ácido.

Además del *vanadio*, este grupo comprende el *niobio*, el *tántalo* y el *protactinio*.

Vanadio (V = 50,95) y compuestos

Reseña histórica. — Fue descubierto en 1830 por **Sefstroem,** y preparado en estado puro en 1868 por **Roscoe.**

Estado natural. — El vanadio es muy abundante en la naturaleza, aunque en concentraciones pequeñas; así, se halla en las bauxitas, en las arcillas y en los minerales de numerosos metales. El mineral propiamente dicho de vanadio más importante es la *patronita*, que se encuentra exclusivamente en el Perú (riqueza en vanadio: de 10 a 13 %), en los yacimientos de Minasragra. Entre los demás países productores se cuentan EE. UU., diversos territorios africanos, Chile y España (Sierra Marta).

Preparación y propiedades. — Se obtiene en estado metálico reduciendo el cloruro de vanadio por el sodio o el hidrógeno, o a partir del óxido. Es un metal blanco, cristalino, de densidad 5,7; funde a 1 710° C. Se combina con el oxígeno, cloro, nitrógeno y carbono; se disuelve en los ácidos minerales, excepto en el clorhídrico.

Principales compuestos. — Las combinaciones más interesantes del vanadio son: el *dióxido*, V_2O_2, polvo gris de aspecto metálico; el *sexquióxido*, V_2O_3, polvo negro obtenido por reducción del óxido vanádico, V_2O_5, con carbón. Se conocen también el *óxido hipovanádico*, V_2O_4, y el *óxido pervanádico*, V_2O_7.

De todos los compuestos, los más estables y más importantes son aquellos en los que el vanadio se presenta como pentavalente. El *óxido vanádico*, o *anhídrido vanádico*, se prepara calcinando los otros óxidos de vanadio; es un polvo de color pardo, insoluble en el agua. Se combina fácilmente con las bases, ya por fusión con los carbonatos alcalinos, ya por ebullición con los álcalis cáusticos. El *vanadio pentavalente* forma vanadatos orto, meta y piro, que corresponden a las sales de los diferentes ácidos fosfóricos. Las *sales alcalinas de los fosfatos* son blancas.

Por acción del cloro sobre el vanadio metálico o sobre los óxidos de vanadio, se originan *cloruros* y *oxicloruros* de este metal.

Aplicaciones del vanadio. — Se emplea el vanadio en los aceros; añadido al hierro en la proporción de 1 a 2 %, forma las aleaciones de ferrovanadio, que aumentan la elasticidad del acero, así como su resistencia a los choques y a las vibraciones (automóviles), sin disminuir su ductilidad.

Los óxidos de vanadio se utilizan industrialmente para la preparación del negro de anilina.

Niobio (Nb = 92,91) o colombio y compuestos

Reseña histórica. — Se le llamó primeramente *colombio*, denominación que subsiste aún en ciertos países. El químico inglés **Hatchett** lo descubrió en un mineral de Colombia, la *colombita*, en el que está asociado al tántalo; la dificultad que hay que superar para separarlo de éste hizo que se le confundiese con él; finalmente, en 1850, **Rose** y **Marignac** demostraron que se trataba de dos metales distintos, y Rose propuso para el colombio el nombre de *niobio*.

Estado natural y propiedades. — Se encuentra junto al tántalo en la colombita o niobita (Fe, Mn) $[(NbTa)O_3]_2$ que existe nativa, muy diseminada.

El estudio de este mineral ofrece grandes dificultades, pues va acompañado por compuestos tales como los ácidos titánico y wolfrámico, cerita, tierras de la itria, etc., cuya separación es complicada.

Niobio metálico. — Tras varios intentos de otros químicos (Marignac, Rose), Roscoe logró preparar el niobio reduciendo el pentacloruro por el hidrógeno. Actualmente se obtiene principalmente tratando el fluoruro de niobio con sodio.

Es un metal de color gris de acero. D = 12,7. Arde en el aire dando el anhídrido Nb_2O_3. Es maleable; no lo atacan los ácidos nítrico y clorhídrico ni el agua regia; en cambio, se disuelve en el ácido sulfúrico concentrado. Se combina con el cloro, al rojo, dando Cl_3Nb. Funde a 1 950° C. No tiene aplicaciones prácticas.

Principales compuestos. — Se conocen un *protóxido* NbO, un *dióxido* NbO_2, y un *sesquióxido* Nb_2O_3. A. Joly ha obtenido *niobatos* cristalizados por vía seca, calentando el anhídrido Nb_2O_5 con un cloruro o un fluoruro anhidro.

Existen dos *cloruros*, Cl_3Nb y Cl_5Nb, y un *oxicloruro* Cl_3ONb.

Tántalo (Ta = 180,95) y compuestos

Reseña histórica. — En 1802, **Eckeberg** retiró de la *tantalita* procedente de Finlandia un ácido al que llamó "ácido tantálico". El metal recibió el nombre de tántalo a causa de la propiedad que posee su óxido de no poder disolverse en los ácidos (por alusión al suplicio de Tántalo). **Wollaston** creyó reconocer en 1809 la identidad del niobio con el tántalo, con el que se halla asociado en sus minerales, opinión que fue admitida hasta los trabajos de **H. Rose.**

Estado natural. — Se encuentra en la tantalita, que es una niobita en la que predomina el tántalo sobre el niobio.

Preparación y propiedades. — Se obtiene de manera idéntica al vanadio y al niobio. Es muy denso (D = 16,6). Es uno de los primeros metales con que se intentó substituir el carbono en la fabricación de los filamentos de las lámparas de incandescencia. Cuando está completamente exento de óxido, es un metal dúctil, elástico, muy tenaz. Funde a 2 000° C y hierve a una temperatura superior a 3 000° C. De los ácidos minerales, lo ataca solamente el fluorhídrico. Todas estas propiedades lo hacen apto para la fabricación de instrumentos quirúrgicos y de laboratorio (agujas hipodérmicas, cápsulas, crisoles).

Principales compuestos. — Los compuestos del tántalo son análogos a los correspondientes del niobio.

Se conocen varios *óxidos*, varios *cloruros*, y un *oxicloruro* Cl_3OTa. El óxido Ta_2O_5 forma tantalatos al ser tratado con los fluoruros o con los cloruros alcalinos anhidros.

Protactinio (Pa = 231) y compuestos

Este elemento fue descubierto por **Hahn** y **Meitner** en 1918. Se forma en la transmutación radiactiva del uranio. Los compuestos de protactinio se obtienen de los restos de la extracción del radio. El más importante es el *óxido* Pa_2O_5.

Metales del grupo VI a

Cromo y compuestos: Reseña histórica. Estado natural. Preparación, propiedades y aplicaciones. Cloruro cromoso. Cloruro crómico. Compuestos oxigenados. Cromatos. Bicromato de potasio. Bicromato de sodio. Sales oxigenadas del cromo. Reconocimiento y determinación cuantitativa. — **Molibdeno y compuestos:** Reseña histórica. Estado natural. Preparación y propiedades. Principales compuestos. — **Wolframio o tungsteno y compuestos:** Reseña histórica. Estado natural. Preparación y propiedades. Principales compuestos. — **Uranio y compuestos:** Reseña histórica. Estado natural. Preparación y propiedades. Principales compuestos. Reconocimiento y determinación cuantitativa

Los metales de este grupo son: el *cromo*, el *molibdeno*, el *wolframio* y el *uranio*.

Con la valencia VI, que es la más estable, estos metales forman parte del anión de las sales; el único que puede constituir catión exavalente es el uranio (en forma de uranilo). Con otros grados de valencia tienen carácter metálico.

Cromo (Cr = 52,01) y compuestos

Reseña histórica. — El cromo (del griego *khrôma*, color) fue descubierto en 1797 por **Vauquelin,** cuando efectuaba el análisis del cromato de plomo.

Estado natural. — El mineral más utilizado para la extracción del cromo es la *cromita* o *hierro cromado*, Cr_2O_3, FeO, que se presenta cristalizado, de color pardo o negro, muy abundante en Rodesia del Sur y en Turquía; entre los principales países productores se encuentra Cuba. La descomposición de este mineral ha dado origen a la *crocroita* o *plomo rojo*, mineral también aprovechable para la recuperación del cromo.

Preparación, propiedades y aplicaciones. — Se obtiene mediante reducción del óxido, Cr_2O_3, con carbón en el horno eléctrico (Moissan), o reduciendo el óxido con granalla de aluminio. Es un metal gris de acero, brillante.

D = 6,92; funde a 1 600° C.

No se oxida al aire a la temperatura ordinaria. Los ácidos lo atacan difícilmente.

El *ferrocromo*, aleación de hierro, cromo y carbón preparada en un alto horno, sirve para la fabricación del hierro cromado. Se emplea en los aceros al cromo de gran dureza, en la proporción de 2 a 4%.

Los aceros al cromo, a los que se añade níquel y vanadio, sirven para fabricar chapas para blindar y numerosas herramientas y máquinas. Estas aleaciones resisten mejor a los ácidos que el acero ordinario. El acero llamado "inoxidable" contiene 10 % de cromo.

El *nicromo* es una aleación de níquel, hierro y cromo, empleada para la obtención de resistencias eléctricas, a causa de su elevada resistencia óhmica.

Desde el punto de vista químico, el cromo se presenta con valencia 2 *(sales cromosas)*, con valencia 3 *(sales crómicas* y *cromitos)*, con valencia 5 *(peroxicromatos)*, con valencia 6 *(cromatos* y *bicromatos)* y con valencia 7 *(ion percrómico)*.

Cloruro cromoso (Cl_2Cr).

— Se forma por acción del ácido clorhídrico a una solución de cloruro crómico. El hidrato $Cr_2O(OH)_4$ se presenta en forma de cristales sedosos blancos.

En solución en el agua, existe en forma hidratada $Cl_2Cr, 6H_2O$, dando un licor azul, muy oxidable, que manifiesta un gran poder reductor.

Se conoce también el compuesto de fórmula Cl_2Cr, N_2H_4, de color lila.

Cloruro crómico (Cl_3Cr).

— Se obtiene enviando una corriente de cloro seco sobre una mezcla de óxido de cromo y carbón.

En estas condiciones es anhidro. Forma escamas de color rosa, que se disuelven muy lentamente en el agua hirviendo, hidratándose. Esta transformación es extremadamente rápida en presencia de una muestra de cloruro cromoso. Los cristales que se depositan tienen la fórmula $Cl_3Cl, 6H_2O$.

Compuestos oxigenados.

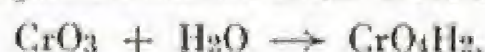
— Se conocen los óxidos siguientes: el *protóxido*, CrO, el *sesquióxido*, Cr_2O_3, el *óxido salino*, Cr_3O_4, y el *anhídrido crómico*, CrO_3. Solamente tienen interés práctico el sexquióxido y el anhídrido.

El *sexquióxido* forma cristales romboédricos de color verde negruzco, que se pueden obtener por fusión del biocromato con azufre. Le corresponden dos modificaciones de hidratos, *verdes* y *violeta*, obtenidos por precipitación de dos tipos de sales mediante amoniaco. Se utiliza para decorar la porcelana. El hidróxido $Cr_2(OH)_6$ se obtiene añadiendo amoniaco a una solución de cloruro crómico. El hidrato $Cr_2O(OH)_4$ se precipita cuando se trata con amoniaco una disolución de oxicloruro, Cl_4OCr_2.

El *verde de Guignet*, de hermoso color verde, empleado en la industria de los papeles pintados y para imprimir tejidos, es un hidrato de fórmula $Cr_2O(OH)_4$, que se obtiene fundiendo dicromato potásico con ácido bórico.

El *anhídrido crómico* u *óxido crómico* se prepara por la acción del ácido sulfúrico sobre el dicromato potásico; se presenta formando agujas de color rojo vivo, de densidad 2,7, que funden a 193° C dando un líquido rojo obscuro, muy soluble en el agua, delicuescentes. Estas soluciones se emplean como oxidantes. Calentándolo al rojo, el óxido crómico se descompone en sesquióxido y oxigeno. Si se le calienta con ácido clorhídrido, desprende cloro y se transforma en cloruro crómico.

Se disuelve en el agua formando *ácido crómico*, de color amarillo:



$$CrO_3 + H_2O \rightarrow CrO_4H_2,$$

que se halla disociado, y del que se conocen bien sus sales, los cromatos neutros, isomorfos de los sulfatos; a concentración más elevada, el óxido crómico forma con el agua el ácido dicrómico, anaranjado, cuyas sales, los dicromatos, son comparables a los pirosulfatos.

Cromatos.

— Los cromatos son todos amarillos. Los principales son: el *cromato de sodio*, $CrO_4Na_2, 10H_2O$, que forma cristales monoclínicos, muy higroscópicos; el *cromato de plata*, CrO_4Ag_2, insoluble en el agua; el *cromato potásico*, CrO_4K_2, que se obtiene saturando el bicromato con carbonato potásico y que cristaliza en prismas rómbicos, solubles en el agua; el *cromato de plomo*, que se prepara mezclando una solución de acetato de plomo con otra de cromato potásico, y se emplea como colorante amarillo en pintura (el amarillo limón es una mezcla de cromato y de sulfato de plomo).

Bicromato de potasio ($Cr_2O_7K_2$).

— Es el compuesto del cromo que sirve para preparar todos los demás. Se obtiene industrialmente calcinando en un horno de reverbero una mezcla pulverizada de hierro cromado, salitre y carbonato potásico. La masa así formada se trata con agua y se acidula con ácido acético; a continuación se filtra para separar la sílice y la alúmina. El cromato neutro primeramente constituido se transforma en bicromato, que se deja cristalizar. Se presenta en forma de cristales prismáticos de color amarillo rojizo, que funden antes de llegar al rojo.

Calentado con ácido sulfúrico, desprende oxigeno, por lo que se emplea esta mezcla como agente oxidante.

Las soluciones de bicromato potásico, y en general las de todos los bicromatos alcalinos, confieren a las substancias coloidales (gelatina, albúmina, cola) la propiedad de volverse insolubles en el agua caliente y de no hincharse por acción del agua fría; a ello se debe su empleo en la industria fotográfica.

Se ha puesto en evidencia que los cromatos, estables en medio neutro o alcalino, dan bicromatos cuando el medio es alcalino.

Bicromato de sodio ($Cr_2O_7Na_2, 2H_2O$).

— El bicromato de sodio se obtiene de igual manera que el de potasio. Tiende a reemplazar el bicromato potásico en sus aplicaciones, pues es más barato. Es una sal higroscópica, fácilmente soluble en el agua.

Sales oxigenadas del cromo.

— Se conocen las *sales cromosas*, muy oxidables, cuyas soluciones fijan rápidamente el oxígeno del aire, y las *sales crómicas*, que pueden existir en dos modificaciones: las *sales verdes* y las *sales violeta*. Las sales verdes se originan al someter a ebullición las soluciones de las sales violeta.

El *sulfato cromoso*, $SO_4Cr, 7H_2O$, es isomorfo del sulfato ferroso.

El *sulfato crómico*, $(SO_4)_3Cr_2, 12H_2O$, forma cristales de color violeta, higroscópicos, solubles en el agua. Se emplea como mordiente en tintorería y en curtiduría; las pieles tratadas con sulfato de cromo son más resistentes.

El *alumbre de cromo* $(SO_4)_3Cr_2, SO_4K_2, 24H_2O$ (v. ALUMBRES, p. 297), cristaliza en octaedros regulares.

Reconocimiento y determinación cuantitativa.

— Fundiendo un compuesto crómico con nitrato potásico y carbonato sódico, se forma cromato de sodio amarillo, reacción característica del ion crómico. Generalmente se dosifica oxidándolo en cromato y efectuando sobre la solución de éste una determinación yodométrica.

Molibdeno (Mo = 95,95) y compuestos

Reseña histórica. — El molibdeno fue descubierto en 1778 por **Scheele**, que retiró de la molibdenita (a la que se confundía con la plombagina) el óxido molíbdico. Pocos años más tarde, **Hjelm** preparó el ácido molíbdico y aisló el molibdeno. **Berzelius, Debray** y **Sainte-Claire Deville** han estudiado sus propiedades. Su nombre es el del plomo en griego *(molubdos)*.

Estado natural. — El molibdeno y sus compuestos se extraen de la *molibdenita*, S_2Mo, mineral que procede casi exclusivamente de EE. UU. La *wulfenita*, MoO_4Pb, es también aprovechable, aunque mucho menos importante. Chile y México recuperan la molibdenita de los subproductos del cobre y se sitúan entre los primeros países productores de molibdeno.

Preparación y propiedades. — Por tostaciones sucesivas de la molibdenita se obtiene el óxido anhidro MoO_3, que se reduce en corriente de hidrógeno al rojo. El molibdeno así preparado es pulverulento. Por compresión, se puede aglomerar este polvo y formar barras metálicas muy duras, de color blanco de plata. Es dúctil.

Funde a una temperatura próxima a 2 500° C. D = 10,2. Arde en una atmósfera de oxigeno, dando trióxido. Se emplea en forma de alambres para establecer las conexiones metálicas de los filamentos de tungsteno, y como material de electrodos. Forma aleaciones con el hierro *(ferromolibdeno)*, obtenidas por reducción de los óxidos de hierro y molibdeno con carbón. Los aceros al molibdeno son muy resistentes al ataque de los agentes químicos.

El molibdeno forma compuestos en los que entra como bi, tri, tetra, penta y exavalente.

Principales compuestos. — El molibdeno forma gran número de óxidos; los principales son el *óxido* de fórmula MoO_2 y el *anhídrido molíbdico* o *ácido molíbdico*, MoO_3, íntimamente ligado al hidrato MoO_4H_2, que da con las bases un molibdato análogo a los cromatos CrO_4M_2 (M designa un metal alcalino); los molibdatos alcalinos son incoloros en solución; si se vierte un ácido sobre una disolución de molibdato, se obtiene un *polimolibdato*.

La propiedad más característica del ácido molíbdico es la de unirse con otros muchos ácidos, tales como el fosfórico, el silícico, el arsénico, el sulfuroso y los ácidos orgánicos, dando sales muy estables. Las más conocidas son los *fosfomolibdatos* (amarillos).

El heptamolibdato amónico o molibdato amónico ordinario, disuelto en un exceso de ácido nítrico, da, con las soluciones ácidas de los ortofosfatos, un precipitado amarillo *característico* de fosfomolibdato amónico.

Wolframio (W = 183,92) o tungsteno y compuestos

Reseña histórica. — El wolframio fue descubierto por **Fausto de Elhúyar** en 1780. Se le llama también *tungsteno*.

Estado natural. — Los dos minerales más importantes del wolframio son la *wolframita* (wolframato de hierro y manganeso, 76 % de WO_3, 5 % de MnO, 19 % de FeO) y la *scheelita* (wolframato de calcio, 80,6 % de WO_3 y 19,4 % de CaO). Se halla muy abundante en China. Los países grandes productores de estaño, tales como Bolivia, ocupan los

primeros puestos de productores de wolframio, que en tales casos se obtiene como subproducto. Se extrae también en España.

Preparación y propiedades. — Se funde la wolframita con sosa, y se precipita la sal cálcica por tratamiento con cloruro cálcico. Se pasa del wolframio cálcico al óxido de wolframio, y se reduce éste con hidrógeno, en caliente. Se prepara también substrayendo el cloro al exacloruro de wolframio mediante una corriente de hidrógeno.

Generalmente se obtiene en forma de polvo, que se aglomera. En estas condiciones, es un metal blanco, brillante; resiste bien a los ácidos. Puede ser estirado en alambres muy finos de 1/50 a 1/100 de milímetro, empleados en las lámparas de incandescencia, a causa de la temperatura muy elevada que pueden soportar sin fundirse (temperatura de fusión superior a 3 150° C); de todas maneras, las lámparas de filamento de tungsteno deben estar exentas de aire, pues el metal se oxida por efecto del calor al contacto con el oxígeno.

D = 19 aproximadamente. Es más tenaz que el hierro y el níquel, y menos dilatable que la mayor parte de los demás metales. Añadido a los aceros, aumenta considerablemente la dureza de tales aleaciones, que conservan esta propiedad hasta la temperatura de 600° C. Las herramientas de acero al wolframio soportan el calentamiento de un trabajo cinco o seis veces más rápido que el soportado por los aceros ordinarios (aceros rápidos). Con el cobalto y el cromo, forma una aleación muy dura, llamada *estelita*.

El wolframio puede actuar como bi, tri, tetra, penta y exavalente.

Principales compuestos. — Los compuestos de este metal se asemejan mucho a los del molibdeno.

Los más importantes son aquellos en los que el wolframio entra con la valencia 6, que es la más estable.

El *óxido de wolframio*, WO_3, se forma siempre que se calcina un compuesto de este metal en una atmósfera de oxígeno. Forma una masa pulverulenta amarilla, insoluble en el agua y en los ácidos, soluble en los álcalis, con los que da wolframatos.

Los *wolframatos*, derivados del ácido wolfrámico WO_4H_2, se transforman en poliwolframatos al ser tratados por los ácidos.

En fin, como el molibdeno, forma wolframatos complejos.

Uranio (U = 238,07) y compuestos

Reseña histórica. — **Klaproth** descubrió en 1789 un nuevo cuerpo en la pechblenda, al que se denominó *uranio* (en honor del planeta Urano, descubierto poco antes). **Peligot** lo aisló en 1847.

Estado natural. — La mayor parte del uranio se extrae de la *pechblenda*, óxido de uranio asociado a otros compuestos, que contiene de 55 a 80 % de uranio; junto a este mineral, sirve la *carnotita* (uranovanadiato cálcico). Contrariamente a la opinión general, los minerales de uranio son relativamente abundantes, pero los yacimientos ricos son escasos; así, el uranio existe en la naturaleza en mayor cantidad que el cinc y el plomo. Los países mayores productores son el antiguo Congo Belga y el Canadá.

Preparación y propiedades. — La calcinación del uranato amónico da el óxido U_3O_4, que, reducido en el horno eléctrico, conduce a la obtención del metal, no puro, sino con vestigios de carburo. El uranio metálico se asemeja al níquel por su aspecto, y arde a 170° C. Produce chispas al ser sometido a choques. Hacia 1 000° C, fija el nitrógeno y se transforma en nitruro. Es muy estable a la temperatura ordinaria; resiste a la acción de los ácidos y de las bases. Es muy denso (D = 18,7).

El uranio es el elemento natural de mayor masa atómica. Es la substancia madre de los cuerpos radiactivos, y de él se derivan las series del radio y el actinio. Este metal comenzó a adquirir importancia cuando Becquerel descubrió la radiactividad, en 1896.

El uranio forma compuestos tri, tetra, penta y exavalentes; solamente son estables los tetravalentes y los exavalentes.

Principales compuestos. — El *dióxido de uranio*, UO_2, es un polvo pardo claro, que se obtiene reduciendo los óxidos superiores por el hidrógeno.

El *trióxido*, UO_3, se forma por calcinación de las sales exavalentes; forma un polvo amarillo. Se disuelve en los ácidos, dando lugar a las sales de uranilo (catión UO_2); lo disuelven también las bases, y en este caso se forma el ion uránico U_2O_7, al que corresponden los uranatos. Las soluciones de uranatos y de sales de uranilo se hallan en equilibrio.

Las sales uránicas poseen un hermoso color verde fluorescente; el verde de uranio está coloreado por el óxido. El uranato sódico sirve para la obtención de vidrios amarillos con fluorescencia verde.

Las sales de uranilo absorben selectivamente la luz verde, por lo que se emplean en fotografía como fotosensibilizadoras.

El *carburo de uranio*, C_2U, se obtiene en el horno eléctrico por reducción del óxido. Es un cuerpo duro, cristalino, de aspecto metálico. El agua lo descompone, dando una mezcla de hidrógeno, metano y etano.

Por fin, existen los *peruranatos*, que corresponden al óxido de fórmula UO_4. El mayor interés práctico del uranio reside en su utilización en la industria de la energía atómica (radiactividad natural y artificial).

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — Se determina precipitando el ferrocianuro de uranilo, de color pardo. Se dosifica en forma de U_3O_8.

Metales del grupo VII a

Manganeso y compuestos: Reseña histórica. Estado natural. Preparación y propiedades. Cloruro manganoso. Óxidos de manganeso. Óxido manganoso. Óxido mangánico. Dióxido de manganeso. Anhidrido mangánico. Anhidrido permangánico. Permanganato potásico. Sulfato manganoso. Carbonato manganoso. Reconocimiento y determinación cuantitativa. — **Renio**

De los tres elementos que componen este grupo, se conocen bien el *manganeso* y el *renio;* la existencia del tercero, el *tecnecio* (Tc), que ocupa el número atómico 43, es hipotética. Los dos primeros son susceptibles de formar compuestos en los que intervienen con diversas valencias. Cuando actúan como heptavalentes y exavalentes, forman parte del anión (ácidos). En los demás casos, tienen carácter metálico.

Manganeso (Mn = 54,94) y compuestos

Reseña histórica. — Los compuestos de manganeso se conocen desde la época de los romanos. **Scheele** (1774) indicó la existencia del elemento en la magnesia negra (dióxido de manganeso); fue aislado posteriormente por **Gahn.** Sus propiedades han sido estudiadas por **H. Sainte-Claire Deville.**

Estado natural. — Forma diversos minerales, principalmente silicatos y óxidos; de los silicatos, el más corriente es la *rhodonita.* Más importantes son los óxidos, que sirven casi exclusivamente para la extracción del metal: *pirolusita* (MnO_2), *braunita* (Mn_2O_3), *manganita* (MnO, OH) y *hausmanita* (Mn_3O_4).

Preparación y propiedades. — A pesar de su analogía con el hierro, no se puede preparar como éste por reducción del óxido mediante carbón en el horno, pues en estas condiciones se forma carburo de manganeso. El único procedimiento aplicable consiste en tratar el óxido Mn_3O_4 por el aluminio.

El manganeso es un metal gris, duro, quebradizo. D = 7,1. Se oxida por el calor o en atmósfera húmeda, y en frío cuando está en polvo. Descompone el agua; los ácidos lo atacan fácilmente.

Reduciendo con carbón las mezclas de óxidos de hierro y manganeso, se obtienen los *ferromanganesos*, empleados en la metalurgia del hierro y el acero.

Los compuestos de manganeso se pueden clasificar, según la valencia del metal, de la manera siguiente:

Valencia 2, sales manganosas;
Valencia 3, sales mangánicas;
Valencia 4, manganitos;
Valencia 6, manganatos;
Valencia 7, permanganatos.

Cloruro manganoso (Cl_2Mn). — Anhidro, es un polvo cristalino de color rosa. Hidratado, tiene la fórmula $Cl_2Mn, 4H_2O$.

Se presenta en forma de cristales rosa, y se obtiene tratando el dióxido MnO_2 con ácido clorhídrico; al mismo tiempo, tiene lugar un desprendimiento de cloro (preparación del cloro en el laboratorio):



$$MnO_2 + 4ClH \rightarrow Cl_2Mn + 2H_2O + Cl_2.$$

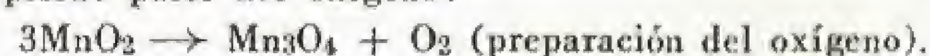
Se puede obtener el cloruro anhidro a partir del cloruro hidratado, calentándolo en una corriente de cloruro de hidrógeno.

Óxidos de manganeso. — Se conocen varios óxidos de manganeso, a saber: el *óxido manganoso*, MnO; el *óxido salino*, Mn_3O_4; el *óxido mangánico*, Mn_2O_3; el *dióxido*, MnO_2; el *anhídrido mangánico*, MnO_3; el *anhídrido permangánico*, Mn_2O_7.

Óxido manganoso (MnO). — Éste se obtiene por calcinación del carbonato en ausencia de aire. Forma una masa verdosa, inalterable al aire. Los álcalis, precipitan de las disoluciones de una sal manganosa un hidróxido $Mn(OH)_2$, blanco, que pardea al estar expuesto al aire, a causa de la oxidación.

Óxido mangánico (Mn_2O_3). — Se encuentra en la naturaleza, ya anhidro *(braunita)*, ya hidratado *(acerdesa)*. Se obtiene por acción del cloro sobre una suspensión de carbonato manganoso en agua.

Dióxido de manganeso (MnO_2). — Es el compuesto de manganeso más importante. Existe en la naturaleza *(pirolusita)*. Calentado al rojo, pierde parte del oxígeno:



$$3MnO_2 \rightarrow Mn_3O_4 + O_2 \text{ (preparación del oxígeno).}$$

Se puede considerar como el anhídrido del ácido manganoso, del que se conocen las sales.

El dióxido hidratado y los manganitos actúan como oxidantes; se emplean para desecar aceites (ricino, linaza).

Anhídrido mangánico (MnO_3). — A este anhídrido, desconocido en estado libre, corresponde un hidrato MnO_4H_2, cuyas sales, verdes, son solamente estables en medio fuertemente alcalino, pues de otra manera se transforman rápidamente en permanganatos. La más importante es el *manganato potásico*, MnO_4K_2, que se obtiene fundiendo dióxido de manganeso con hidróxido potásico; su solución acuosa tiene la propiedad de cambiar de color cuando se le añade una substancia alcalina; pasa del verde al rojo y al violeta, razón por la que también se conoce esta sal con el nombre de *camaleón mineral*.

Anhídrido permangánico (Mn_2O_7). — Es un líquido negro verdoso, que detona a 40° C. Le corresponde el ácido MnO_4H, cuya solución acuosa, obtenida por descomposición del permanganato de bario mediante ácido sulfúrico, es roja por reflexión y violeta por transparencia (dicroismo). Es un oxidante enérgico.

Permanganato potásico (MnO_4K). — Se prepara calentando en un crisol de tierra refractaria dióxido de manganeso con potasa cáustica; la masa obtenida se disuelve en agua y se hace pasar por la solución una corriente de anhídrido carbónico. Forma cristales de color violeta obscuro, casi negros. La disolución es rojo púrpura. Posee un gran poder oxidante sobre las materias orgánicas, por lo que se utiliza como desinfectante y antiséptico. En el laboratorio, sirve para las manganimetrías.

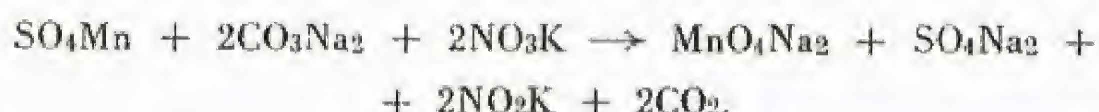
El permanganato potásico es isomorfo del perclorato potásico.

Sulfato manganoso (SO_4Mn). — Se forma tratando un óxido cualquiera de manganeso con ácido sulfúrico, en caliente. Cristaliza con 7 moléculas de agua. Es isomorfo de los sulfatos ferrosos y de magnesio.

Puede cristalizar también con 5 moléculas de agua, siendo en tal caso isomorfo del sulfato de cobre.

Carbonato manganoso (CO_3Mn). — Es isomorfo de los carbonatos de calcio y de hierro. Se prepara tratando una sal manganosa con una solución de carbonato sódico. Es un polvo blanco insoluble en el agua. Al contacto del aire, pardea.

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — Las sales de manganeso producen una coloración verde característica cuando se funden con carbonato sódico y nitrato potásico, por formarse manganato sódico:



$$SO_4Mn + 2CO_3Na_2 + 2NO_3K \longrightarrow MnO_4Na_2 + SO_4Na_2 + 2NO_2K + 2CO_2.$$

Las sales bivalentes de manganeso se dosifican con permanganato potásico.

Renio (Re = 186,31)

El renio fue descubierto por **Noddack** en 1925 y se obtiene reduciendo el bisulfuro S_2Re con hidrógeno. Es un metal blanco, muy pesado (D = 21,4), difícilmente fusible. En su conducta química, se asemeja al manganeso. Se disuelve en los ácidos nítrico y sulfúrico. Es prácticamente inoxidable al aire. Se emplea como catalizador y en ciertas aleaciones, asociado al wolframio.

Forma combinaciones tri, tetra, penta, exa y heptavalentes.

Metales del grupo VIII

En este grupo se da la particularidad que cada período agrupa tres elementos, mientras que en los demás, si se exceptúa el caso de los lantánidos, a cada período corresponde un solo elemento. Todos los elementos del grupo manifiestan un carácter metálico muy acusado.

Distinguiremos dentro del grupo:

1°, los elementos del hierro: hierro, cobalto y níquel;

2°, los elementos del platino: rutenio, rodio, paladio, osmio, iridio y platino.

Metales del hierro

Los elementos del hierro son polivalentes; la transición de un grado de valencia a otro se efectúa fácilmente y se pone de manifiesto por un cambio de coloración de las sales correspondientes. Forman sales complejas, en especial el cobalto, lo que les asemeja al cromo.

Hierro (Fe = 55,85) y compuestos

Reseña histórica. — El hierro (del latín, *ferrum*) es conocido desde la más remota Antigüedad, debido a la facilidad con que sus óxidos se reducen al estado metálico por acción del carbón; los chinos lo empleaban ya varios siglos antes de la era cristiana; el temple es citado en la *Odisea;* los romanos practicaban la cementación; la fundición data del siglo XVI.

Estado natural. — El hierro entra en la composición de la mayor parte de las substancias naturales, minerales, vegetales y animales.

Se halla en estado nativo en los meteoritos. Los compuestos oxigenados más ricos son utilizados como minerales de donde se extrae el elemento. Los principales son:

El *óxido de hierro magnético*, o *magnetita*, Fe_3O_4, que contiene cerca de 72 % de hierro (Suecia, Noruega) y el *óxido férrico*, Fe_2O_3, la variedad cristalizada del cual (oligisto) se encuentra en la isla de Elba; en Francia, formando en general masas amorfas, compactas, terrosas, abunda otra variedad, la *hematites*. Estos óxidos son anhidros;

El *sesquióxido de hierro hidratado*, $2Fe_2O_3 . 3H_2O$, que existe con profusión en Europa Central, en donde forma masas amarillas conocidas con el nombre de *limonita* y *hierro oolítico;*

El *carbonato de hierro*, CO_3Fe, o *siderosa*, que se encuentra en las minas de Inglaterra, en los Pirineos y en el centro de Francia.

Metalurgia del hierro. — V. capítulo especial: METALURGIA (p. 351).

Propiedades del hierro. — El hierro es un metal blanco grisáceo, dúctil y maleable. Se puede estirar en alambres muy finos, y forjar en láminas muy delgadas (chapas). Es muy tenaz.

La densidad del hierro puede variar de 7,78 a 7,84, según el trabajo a que haya sido sometido (forjado, laminado, etc.).

El hierro funde a 1 500° C; antes de fundir, se ablanda y entonces se puede trabajar con el martillo e incluso soldar con otro fragmento.

Propiedades magnéticas. — Desaparecen cuando el hierro es calentado al rojo a partir de una temperatura denominada *punto de Curie*. El llamado hierro dulce es un hierro industrial en el que se ha eliminado la mayor parte de las impurezas que lo acompañan generalmente (carbono, silicio, fósforo).

Propiedades químicas. — Es inalterable en el aire, en el oxígeno y en el agua exenta de aire; en el aire húmedo, se cubre con una capa de sesquióxido hidratado: para evitar este ataque, se le protege con una capa de estaño (hojalata), o de cinc (hierro galvanizado), o de pintura, generalmente a base de minio.

Calentado al rojo, se oxida en presencia de oxígeno y da el óxido Fe_3O_4 (óxido de batiduras). A esta temperatura, descompone el vapor de agua.

En general, se combina con todos los metaloides, excepto con el nitrógeno.

Los ácidos, diluidos o concentrados, le disuelven con desprendimiento de hidrógeno; el único que no lo ataca es el ácido nítrico.

Cloruros y sulfuros. — **Cloruro ferroso (Cl_2Fe).** — Éste se obtiene calentando el hierro al rojo en una corriente de cloruro de hidrógeno seco. Forma cristales hexagonales de color blanco, delicuescentes, muy solubles en el agua; se le conocen varios hidratos, de los cuales el que contiene 6 moléculas de agua es estable hasta 27,4° C.

Cloruro férrico (Cl_3Fe). — Se obtiene anhidro cuando se dirige una corriente de cloro seco sobre hierro calentado al rojo. Cristaliza en

hojuelas de color pardo, muy solubles en el agua, a la que comunican coloración parda, que procede del $Fe(OH)_3$ que se forma en estado coloidal. Hidratado, se congela en forma de cristales de color rojo anaranjado, Cl_3Fe, $6H_2O$.

Sulfuro ferroso (SFe). — Se prepara artificialmente fundiendo juntos azufre y limaduras de hierro. Este compuesto sirve para la preparación de sulfuro de hidrógeno en los laboratorios.

Bisulfuro de hierro (S_2Fe). — Se halla con profusión en la naturaleza, formando la *pirita de hierro.* Es un compuesto dimorfo, es decir, que puede presentarse en forma de cristales cúbicos de color amarillo de oro *(pirita marcial)*, u ortorrómbicos de color amarillo verdoso *(marcasita)*. Esta última se altera en una atmósfera de aire húmedo y da sulfato ferroso.

En la industria, se emplea la pirita para preparar el anhídrido sulfuroso.

Óxidos de hierro. — Los compuestos del hierro son: el *óxido ferroso*, FeO; el *óxido férrico*, Fe_2O_3, y el *óxido ferroso férrico*, Fe_3O_4.

Óxido ferroso (FeO) y oxídulo de hierro. — Se obtiene anhidro por reducción al rojo de un óxido superior en una corriente de hidrógeno. Es un polvo pirofórico negro. El hidróxido que le corresponde $Fe(OH)_2$, *hidróxido ferroso*, se obtiene por acción de los álcalis sobre una solución de una sal ferrosa. Por efecto del oxígeno, el hidróxido, que al formarse es blanco, pasa a gris y ulteriormente a verde y pardo.

Óxido férrico (Fe_2O_3). — Se encuentra en la naturaleza (ver texto anterior). Se prepara anhidro descomponiendo por el calor el sulfato ferroso o el sulfato férrico. Es un polvo rojo muy fino (rojo de pulimento), empleado para pulir el vidrio y los metales, e igualmente para la confección de pinturas (rojo inglés).

El hidróxido $Fe(OH)_3$ es el precipitado que se obtiene al añadir una solución alcalina a una sal férrica. Se disuelve fácilmente en los ácidos. Al lado de su carácter básico, manifiesta propiedades ácidas, y puede dar lugar a la formación de ferritos, por ejemplo ferrito sódico, FeO_3Na_3. Por efecto del calor, pierde agua y, al rojo blanco, se transforma en óxido férrico.

Óxido ferroso férrico (Fe_3O_4). — Se halla en la naturaleza *(magnetita)*; es atraído por el imán, y, a su vez atrae el hierro *(óxido magnético)*. Es el compuesto oxigenado del hierro más estable a temperatura elevada.

Sales ferrosas, sales férricas. — Las sales oxigenadas del hierro forman dos series:

Las *sales ferrosas*, en las que el elemento funciona como divalente, que son incoloras en estado anhidro y verdes cuando están hidratadas; poseen reacción ácida y se oxidan fácil y rápidamente en el aire dando sales férricas (cuerpos reductores);

Las *sales férricas*, en las que el hierro es trivalente, que son generalmente incoloras en estado anhidro, y amarillas o pardas cuando están hidratadas.

Sulfato ferroso (SO_4Fe) [vitriolo de hierro]. — Cristaliza con 7 moléculas de agua. Se prepara industrialmente por oxidación de las piritas de hierro, o por acción del ácido sulfúrico sobre desperdicios de hierro.

Por efecto del calor, pierde 6 moléculas de agua a 100° C; la séptima se separa a 300° C; se descompone al rojo en anhídridos sulfuroso y sulfúrico y en óxido férrico. Los cristales, verdes, se cubren con una capa de óxido férrico pardo al ser expuestos al aire. Su solución absorbe el dióxido de nitrógeno. Con los sulfatos alcalinos, da lugar a sulfatos dobles isomorfos de los de la serie magnesiana.

Se emplea como mordiente y en la preparación de tintas; sirve igualmente como desinfectante, gracias a su poder reductor (ver texto anterior); se emplea también para la fabricación del ácido sulfúrico denominado "de Nordhausen".

Sulfato férrico [$(SO_4)_3Fe_2$]. — Cristaliza difícilmente. Se prepara por oxidación de la solución de sulfato ferroso. Con los sulfatos alcalinos, da sales dobles que pertenecen a la clase de los alumbres.

Forma con las materias orgánicas compuestos muy estables e imputrescibles, por lo que se emplea como desinfectante, para la desinfección de las aguas industriales y las aguas de alcantarilla, y para coagular la sangre de los mataderos. Desinfectante de los pozos negros.

Ferrocianuros y ferricianuros. — V. CIANÓGENO, p. 331.

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — Las sales ferrosas y férricas dan soluciones de color azul intenso al reaccionar con ferricianuro y ferrocianuro potásico respectivamente, lo que las caracteriza. La determinación cuantitativa se puede efectuar precipitando el hierro en forma de hidróxido férrico, que, una vez calcinado a óxido férrico, se pesa.

Cobalto (Co = 58,04) y compuestos

Reseña histórica. — Considerados durante largo tiempo como materias improductivas, los minerales de cobalto eran designados por los mineros alemanes con el nombre de *cobalus*. Más tarde, este metal desconocido fue designado por el vocablo *cobalto* **(Basilio Valentín, Paracelso).** En el siglo XVI, un vidriero de Bohemia, **Cristóbal Schürer,** descubrió que al añadir cobalto al vidrio éste adquiría una magnífica coloración azul, y vendió el secreto a los ingleses.

En 1773, **Brandt** logró aislar el cobalto, aunque no consiguió obtenerlo en estado puro.

Estado natural. — Existe en la naturaleza en estado de peróxido de manganeso, que contiene óxidos de bario, de calcio, de níquel y de cobalto. La proporción de cobalto es de 10 %.

La *esmaltina*, As_2Co, es un arseniuro de cobalto impuro, que contiene azufre, níquel y hierro.

Debemos hacer constar que no existe un solo mineral de níquel que no contenga cobalto.

Metalurgia del cobalto. — Desde el punto de vista industrial, se trata siempre de obtener el óxido, pues el cobalto puro no tiene sino muy pocas aplicaciones prácticas.

De color blanco de plata, el cobalto es más duro que el hierro magnético, D = 8,6. Inalterable en el aire, se oxida al rojo y descompone el vapor de agua a esta temperatura.

Principales compuestos. — Cloruro de cobalto (Cl_2Co). — Se obtiene por acción del cloro sobre el cobalto en polvo. Se presenta en forma de hojuelas azules, con 6 moléculas de agua. Su solución es roja y se vuelve azul por concentración a seco (tintas simpáticas).

Óxidos de cobalto. — Se conocen tres óxidos: el *óxido cobaltoso*, CoO; el *óxido cobáltico*, Co_2O_3, y el *óxido cobaltoso cobáltico*, Co_3O_4.

El cobalto forma dos series de sales: *cobaltosas* y *cobálticas*, de las cuales las primeras son la más conocidas por ser las más estables.

El *azul de Thénard*, muy tenaz, es el aluminato de fórmula Al_2O_3, CoO, empleado para la impresión de billetes de banca.

El cobalto forma con el amonio gran número de combinaciones, las *aminas de cobalto*. La primera aplicación práctica del cobalto consiste en el *cobaltado* de ciertos instrumentos, en particular de cirugía, obtenido por vía electrolítica. Las demás aplicaciones conciernen a la preparación de esmaltes y pinturas.

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — La perla de la sal de fósforo impregnada con una sal de cobalto tiñe de azul la zona reductora de la llama. La determinación cuantitativa se efectúa por reducción de los óxidos de cobalto a cobalto metálico, que se pesa.

Níquel (Ni = 58,69) y compuestos

Reseña histórica. — El níquel fue descubierto en 1751 por un mineralogista sueco, **Cronstedt,** en el *kupferníquel*, mineral que fue considerado primeramente como un compuesto de cobre, y posteriormente como un mineral de cobalto.

Cronstedt demostró que se trataba de un cuerpo nuevo. **Bergmann,** en 1775, confirmó los trabajos de Cronstedt.

Estado natural. — Existe en la naturaleza en estado de arseniuro *(kupferníquel)*. Se encuentra en Nueva Caledonia un silicato de magnesio y de níquel, la *garnierita*, de fórmula $SiO_4H_2(Ni, Mg)$. Es igualmente importante la blenda de níquel, SNi.

Metalurgia del níquel. — Se extrae de los minerales en los que se halla combinado con el azufre o con el arsénico, y de la garnierita (v. METALURGIA, p. 355).

Propiedades. — Es un metal blanco brillante, susceptible de ser pulido a la perfección. El níquel es dúctil y maleable. Más duro que el hierro, magnético, su densidad puede variar de 8,3 a 8,8 Es inalterable en el aire, arde en una atmósfera de oxígeno y descompone el agua cuando se le calienta al rojo, al igual que el hierro. Cuando está finamente dividido, el níquel se combina con el óxido de carbono a 60° C y da un líquido incoloro, el *níquel tetracarbonilo*, $Ni(CO)_4$, que detona cuando se le calienta.

Se emplea para la fabricación de monedas, aleado con el cobre, y para la obtención de chapas blindadas, aleado con el acero.

Por electrólisis del sulfato doble de níquel y amonio, se pueden proteger los metales oxidables con una capa inalterable en el aire (hierro niquelado). Las superficies así cubiertas pueden ser pulimentadas y volverse extremamente brillantes.

Sirve para la fabricación de utensilios domésticos (cubiertos, cazuelas, fuentes, etc.).

Principales compuestos. — Cloruro de níquel (Cl_2Ni). — Se obtiene en forma de hojuelas cristalinas amarillas cuando se calienta níquel en una corriente de cloro.

Óxido niqueloso (NiO). — Se encuentra en la naturaleza *(bunsenita)*. Se obtiene por calcinación del carbonato, el nitrato o el hidróxido. El hidróxido $Ni(OH)_2$ se prepara por precipitación de una sal de níquel con potasa.

Óxido niquélico (Ni_2O_3). — Es un polvo negro, que se descompone por efecto del calor en oxígeno y óxido niqueloso.

Óxido niqueloso niquélico (Ni_3O_4). — Se obtiene por acción del oxígeno sobre el níquel a 400° C.

Sulfato de níquel (SO_4Ni, $7H_2O$). — Es isomorfo de los sulfatos de hierro y de magnesio; forma sulfatos dobles con los sulfatos alcalinos, isomorfos de los sulfatos dobles de la serie magnesiana. Es estable en el aire.

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — Ambas operaciones pueden ser llevadas a cabo precipitando el níquel con diacetiloxina.

Metales del platino

Los metales del platino comprenden los elementos que lo acompañan constantemente en su mineral; todos ellos tienen en común numerosas propiedades, así como estrechas relaciones de isomorfismo.

Se pueden subdividir en dos clases, en función de sus densidades y de sus masas atómicas.

		PLATINO	IRIDIO	OSMIO
Metales pesados	Masa atómica ...	195,23	192,2	190,2
	Densidad	21,5	22,4	22,5
		PALADIO	RODIO	RUTENIO
Metales ligeros	Masa atómica ...	106,7	102,91	101,1
	Densidad	11,4	12,1	11,0

Platino (Pt = 195,23) y compuestos

Reseña histórica. — El platino fue citado por vez primera por el sabio español **Antonio de Ulloa,** en 1748. **Watson,** en 1750, lo definió como un nuevo metal; **Scheffer,** en 1752, lo describió con el nombre de oro blanco y de platina de Pinto. El mineral de Scheffer procedía de las arenas auríferas del río Pinto. El platino fue estudiado por **Marquer** y **Baumé** (1758). El conde de **Sckingen** preparó el metal en forma de panes y de hilos finos (1772). En 1819, se descubrió, en los escombros de las minas de la región de los Urales, un metal blanco, que fue identificado como platino en 1823 **(Humboldt, Rose, Ehrenberg). Achard,** en 1784, había obtenido el primer crisol de platino. **Wollaston,** a principios del siglo XIX, y más tarde **Sainte-Claire Deville** fomentaron la metalurgia del metal.

Estado natural. — Se encuentra en Colombia, México y Borneo, y en Siberia, en los montes Urales. Se halla siempre asociado con los metales pesados de la mena del platino, en ciertas variedades de arena procedentes de rocas antiguas.

El mineral de platino se compone de granos irregulares de platino nativo, mezclados con pajuelas de osmiuro de iridio, con arena y con ciertos compuestos del hierro y del titanio. Estas pajuelas de osmiuro de iridio contienen, además, rodio, rutenio, hierro y cobre.

Propiedades. — Antaño, la esponja de platino, obtenida por metalurgia, era comprimida y batida al rojo blanco, y reducida a láminas. H. Sainte-Claire Deville y Debray, consiguieron la fusión en un horno de cal, por medio de la llama oxhídrica.

El platino puro es un metal dúctil, maleable, de color gris, muy pesado. D = 21,5, fusible al soplete a 1 780° C. El platino fundido absorbe el oxígeno y gallea como la plata.

El platino es muy poroso; absorbe los gases con desprendimiento de calor. Esta propiedad es muy marcada en la *esponja de platino.*

El cinc, el plomo, el estaño y la plata forman con este elemento *aleaciones* muy fusibles. El platino se combina directamente con el fósforo, el arsénico, el boro y el silicio.

El platino no se oxida, cualquiera que sea la temperatura.

Es insoluble en los ácidos sulfúrico, clorhídrico y nítrico, y fácilmente soluble, en cambio, en el agua regia.

Es atacado por el cianuro potásico, y por el salitre en fusión.

Aplicaciones. — Se utiliza para la fabricación de crisoles, cápsulas y demás aparatos de laboratorio, que pueden ser sometidos a temperaturas elevadas, sin alterarse, y en la industria para construir aparatos de destilación de gran tamaño en que se concentra el ácido sulfúrico. Sirve como *catalizador* en ciertas industrias.

Aleaciones. — Aleado con el cobre, da una aleación utilizada por los joyeros y los dentistas *(oro duro).* Los objetos fabricados con platino no son nunca de platino puro, pues serían demasiado blandos. El platino contiene siempre iridio, rodio y hierro, que le confieren dureza.

Con el iridio en proporción de 10 a 20%, da aleaciones que pueden ser trabajadas como el hierro (metro internacional).

Compuestos del platino. — El *cloruro platínico,* Cl_4Pt, se prepara disolviendo el platino en agua regia. La solución es amarilla; evaporada, da cristales de color rojo anaranjado de *ácido cloroplatínico,* Cl_4Pt, 2ClH, $6H_2O$. Es el cloruro de platino del comercio. El cloruro anhidro se prepara difícilmente tratando la sal anterior con una corriente de cloro a 350° C.

Si se añade una solución de cloruro potásico a la disolución del ácido cloroplatínico, se obtiene un precipitado de cloroplatinato potásico insoluble en el agua. El cloroplatinato amónico, calcinado, conduce a la formación de la *esponja de platino.*

El *cloruro platinoso,* Cl_2Pt, se obtiene calentando a 200° C el cloruro platínico, que en tales condiciones pierde cloro. Se descompone a temperatura más elevada.

Óxido platinoso, PtO. Se obtiene el hidróxido tratando el cloruro platinoso con potasa. Este hidróxido, $Pt(OH)_2$, tratado por el calor, da el óxido correspondiente, PtO, que se presenta en forma de un polvo negro.

Óxido platínico, PtO_2. Se obtiene su hidróxido $Pt(OH)_4$ calentando a ebullición platino con potasa; al añadir ácido acético, se forma un precipitado que, por calcinación, se transforma en PtO_2.

Iridio (Ir = 192,2) y compuestos

Reseña histórica. — **Vauquelin** y **Fourcroy** (1803) sospecharon ya la existencia del iridio. Fue descubierto por **Tennant** al mismo tiempo que el osmio (1804), y obtenido puro en 1885 por **Stas.**

Propiedades. — El iridio obtiene a partir del osmiuro de iridio, residuo de la preparación del platino.

Es un metal blanco brillante cuando está fundido; muy duro, quebradizo; funde a 1 950° C (el más difícilmente fusible después del osmio y el rutenio). Absorbe los gases cuando se presenta en masas finamente divididas. D = 22,4.

Es atacado por el cloro al rojo oscuro e igualmente por el oxígeno a esta temperatura, cuando se halla finamente dividido.

Es inatacable por los ácidos concentrados, el agua regia y los álcalis fundidos. Se disuelve en una mezcla fundida de nitrato potásico y potasa, y en el bisulfito potásico fundido.

Compuestos del iridio. — Como todos los metales de la mena del platino, posee numerosos compuestos, a menudo muy complejos y bien cristalizados.

Se conocen varios cloruros que dan, con los cloruros alcalinos, *cloroiriditos* y *cloroiridatos.* Existen, igualmente, varios óxidos, así como sulfitos dobles derivados de IrO.

Las sales derivadas de Ir_2O_3 son las más importantes.

Los derivados de IrO_2 son los iridatos. Los compuestos amoniacales de este tipo tienen propiedades muy interesantes; se obtienen por acción directa del amoniaco sobre el cloruro Cl_6Ir_2. Existen tres clases: las *tetraminas irídicas,* las *pentaminas* y las *hexaminas.*

Aplicaciones. — Los patrones del metro y el kilogramo internacionales son de platino iridiado, con 10% de iridio.

Sirve también para la fabricación de crisoles. El *negro de iridio* es utilizado en la técnica de la pintura sobre porcelana.

Osmio (Os = 190,2) y compuestos

Reseña histórica. — Descubierto por **Tennant** al mismo tiempo que el iridio (1804), existe en la naturaleza en estado de osmiuro de iridio, de donde se extrae. La separación del osmio de los demás metales de la mena del platino se funda en el hecho de que posee un peróxido volátil.

Propiedades. — Es un metal de bello color azul, capaz de cristalizar. Muy duro, hasta el punto de que raya el vidrio y el cuarzo, es insensible a la lima. Es muy quebradizo, y puede ser pulverizado.

D = 22,5. Funde en el horno eléctrico, solamente a partir de 2 500° C.

Su carácter químico fundamental es la facilidad con que se puede transformar en óxido volátil OsO_4; este óxido se produce con el oxígeno, en frío, sobre el metal finamente dividido obtenido por vía húmeda, y, al rojo solamente, sobre el metal compacto. El cloro no lo ataca en frío. Cuando se presenta en forma compacta, es inatacable por todos los ácidos, e incluso por el agua regia. Cuando está dividido, se disuelve en los ácidos nítrico y sulfúrico concentrados y calientes. El ácido clorhídrico no lo ataca. La potasa fundida lo transforma en osmiato: OsO_4K_2.

Compuestos del osmio. — El cloro reacciona con el osmio en caliente y da dos compuestos, Cl_2Os y Cl_4Os. Este último da con los cloruros alcalinos unos compuestos bien cristalizados: los cloroosmiatos Cl_4Os, 2ClM, en los que M designa un metal alcalino, isomorfos de los cloroiridatos, cloroplatinatos y cloropaladatos. Se ha sospechado la existencia de un tricloruro Cl_3Os que da lugar a los cloroosmitos, bien definidos. Se ha supuesto igualmente la existencia de otros dos cloruros, Cl_7Os_2 y Cl_8Os, que no han sido sino entrevistos.

Los *compuestos oxigenados* son numerosos: OsO, Os_2O_3, OsO_2, OsO_3 y OsO_4. La existencia del trióxido no es evidente, pero su hidrato OsO_4H_2 da lugar a sales bien definidas: los *osmiatos.*

El *peróxido,* OsO_4, es con mucho el más importante; es el único que se forma directamente y se produce siempre que el osmio o uno de sus compuestos es sometido a un proceso oxidante. Es un cuerpo blanco amarillento, transparente, cristalino, que funde a 40° C y hierve hacia 100° C; emite vapores a la temperatura ordinaria; tiene un olor acre penetrante, extremadamente corrosivo y peligroso. Se caracteriza principalmente por ser un oxidante enérgico. Ha recibido aplicaciones importantes en micrografía. Al ponerse en contacto con su vapor o con su solución, los elementos anatómicos se inmovilizan instantáneamente en las posiciones que ocupaban cuando estaban vivos, en el momento de la acción. Como colorante, actúa sobre ciertos elementos, a los que tiñe de pardo o de negro.

Se han descrito tres *sulfuros*: S_2Os, S_3Os_2, S_4Os.

Con el nitrógeno, el osmio forma varias categorías de compuestos bien definidos: 1°, los *osmiamiatos,* preparados por acción del amoniaco sobre la solución alcalina de peróxido OsO_4 y cuya fórmula es $OsNO_3M$, en la que M es un metal; 2°, el *cianuro,* que puede dar con los cianuros metálicos cuerpos perfectamente cristalizados, los *osmiocianuros*; 3°, *numerosos compuestos amoniacales,* que son sales bien cristalizadas: por ejemplo, el *hidróxido básico de osmildiamonio* da sales: cloruro, sulfato, nitrato, etc.

ROCAS CRISTALINAS

VII I II III IV V VI

I. — GRANITO CON BIOTITA. — Predomina un *feldespato plagioclasa* acompañado de *mica (biotita)*, la cual forma manchas amarillas y rojizas. Arriba, a la izquierda, pueden verse cristales de cuarzo de color gris azulado

II. — CIPOLINO. — *Caliza metamórfica* formada casi exclusivamente por *calcita*, mineral caracterizado por la presencia de maclas y planos de exfoliación cuyos restos es posible ver aún en la mayoría de los granos : sistemas de líneas rectas paralelas. Las partes lisas, es decir, las desprovistas de maclas y planos de exfoliación, son cuarzo que no forma parte del cipolino propiamente dicho

III. — ANFIBOLITA. — En este agregado de cristales de *anfíbol*, varios granos presentan dos sistemas de líneas paralelas que se cortan en un ángulo de aproximadamente 124 grados, característico de los anfíboles

IV. — BASALTO FORMADO POR PERIDOTO Y PIROXENA (AUGITA). — Roca volcánica (lava) en la que pueden distinguirse cristales de gran tamaño (fenocristales, formados antes de la salida al aire libre de la lava y rodeados de una pasta levemente granulada. Entre los « fenocristales » pueden verse los compuestos de *peridoto* u *olivino* (color violáceo) y los formados por *piroxena* o *augita* (rojo pardo, en la parte alta de la imagen)

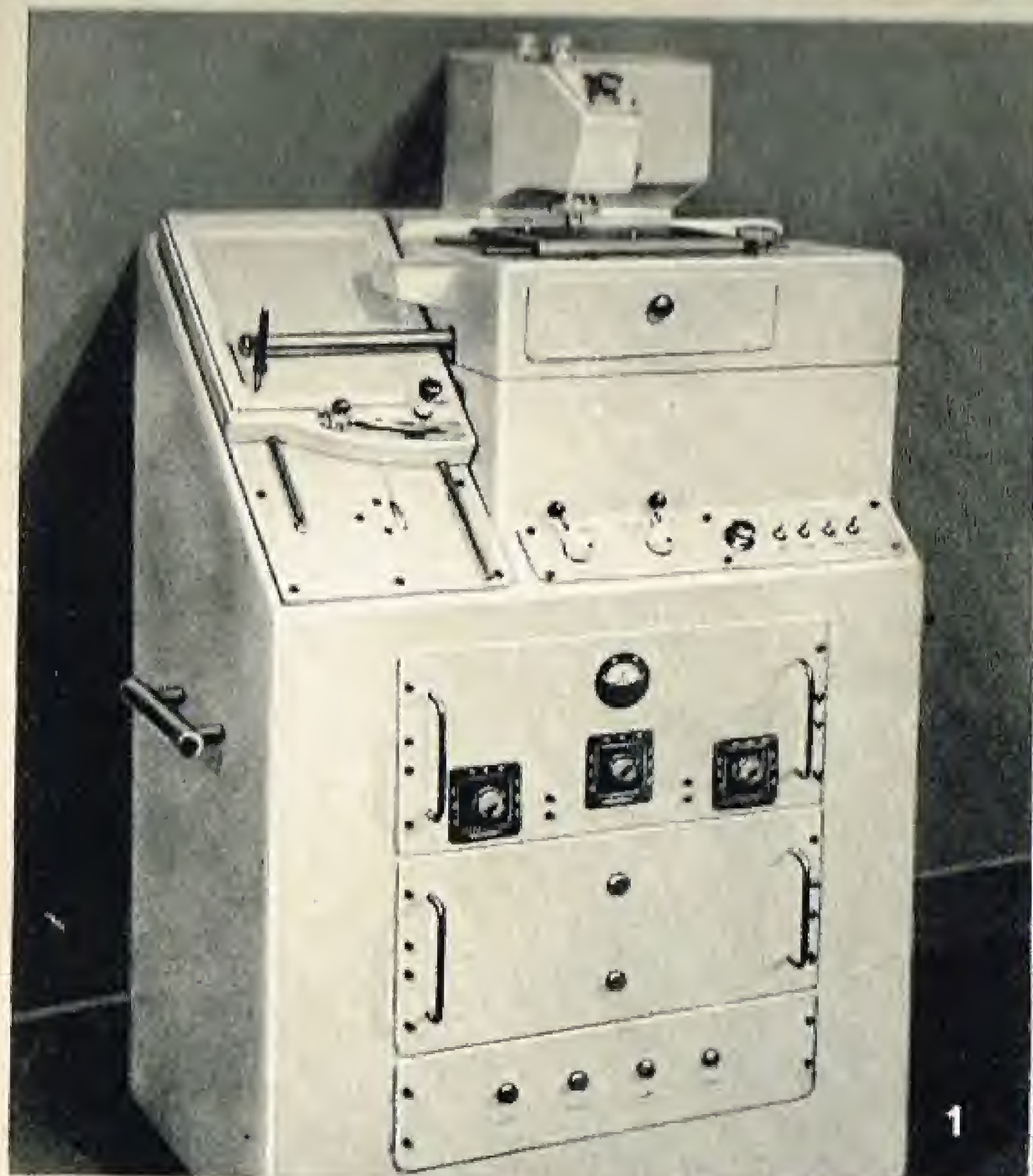
V. — GABRO DOLERITA. — Roca compuesta esencialmente de dos minerales : el *feldespato andesina*, de coloración gris azulada, y un *piroxeno* que polariza en coloridos más vivos. En esta roca pueden observarse las « maclas polisintéticas » del feldespato (alternancia de bandas oscuras y claras)

VI. — GNEIS. — El fondo del corte está formado por granos de cuarzo incoloros o azulados. En la masa de los granos aparecen masas paralelas de mica, limitadas por líneas rectas, que polarizan la luz en coloraciones amarilla, rosa o azul

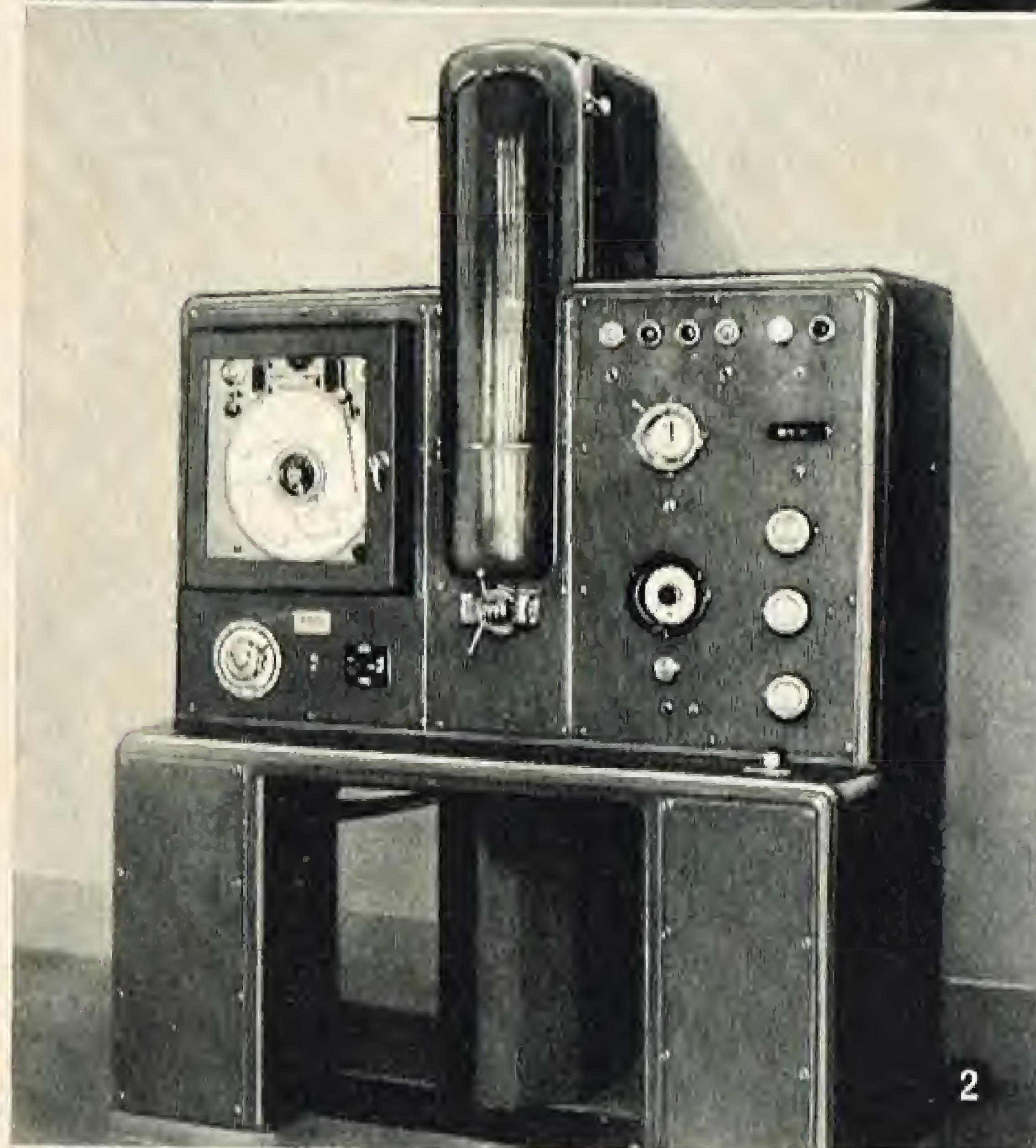
VII. — GABRO. — En el corte pueden distinguirse dos minerales : el *feldespato andesina*, de bordes aproximadamente rectilíneos y caracterizado por su coloración clara, y el *anfíbol* (granos de contornos irregulares), que polarizan la luz en coloraciones amarillas, rojas y azules

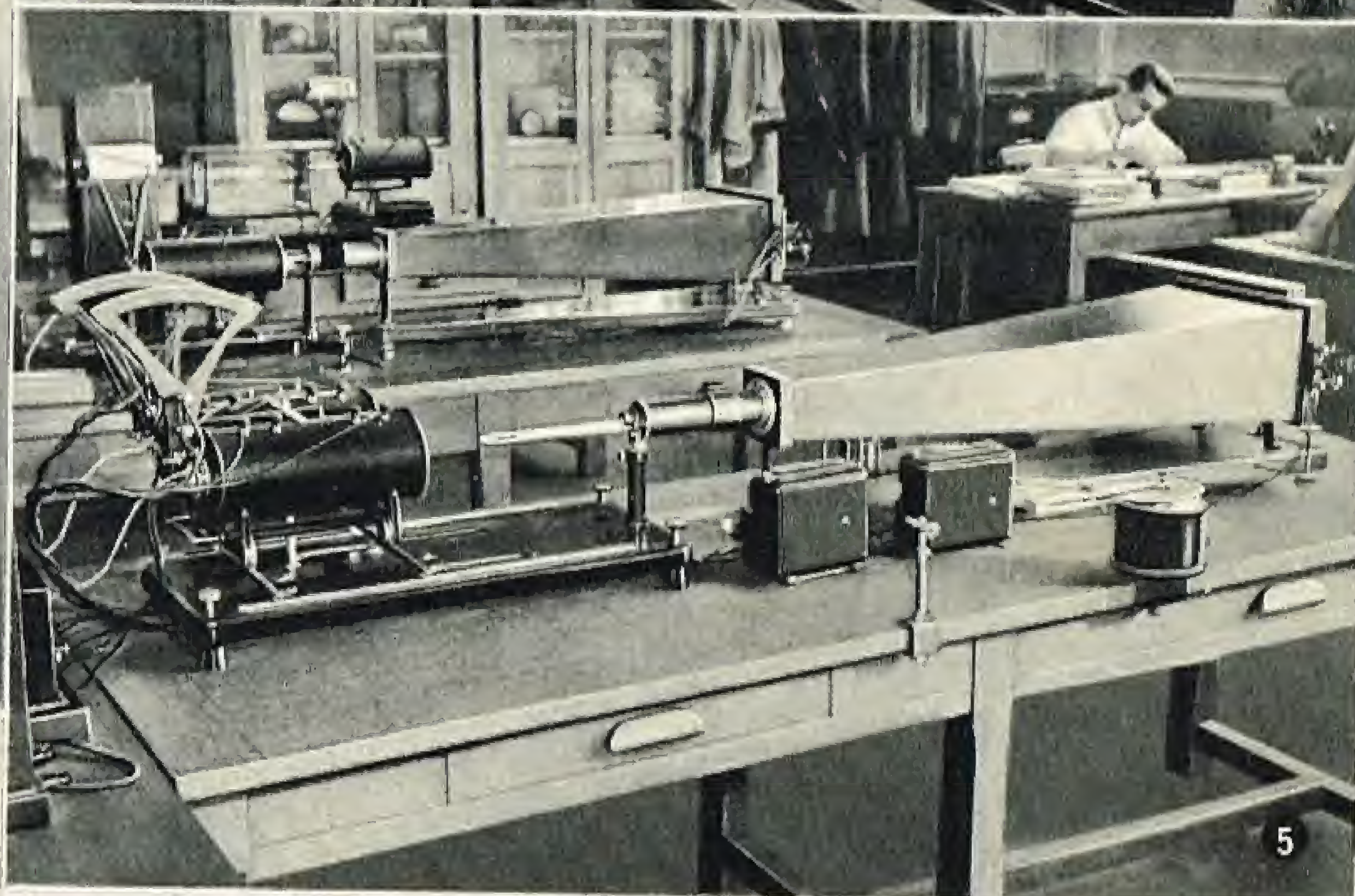
(Microfot. C. Bille)

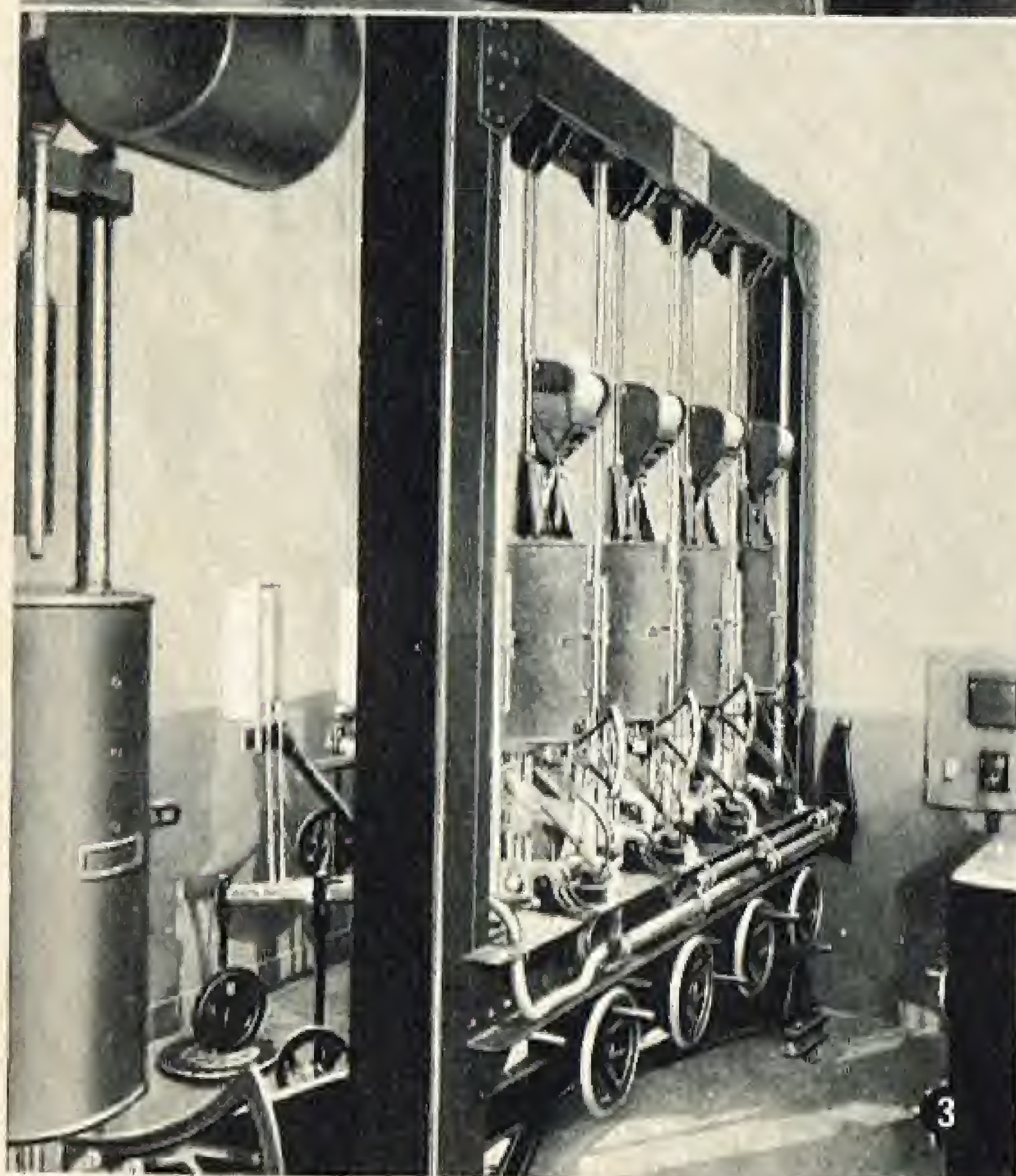
LABORATORIOS MODERNOS DE CONTROL DE MATERIALES Y DE INVESTIGACIÓN

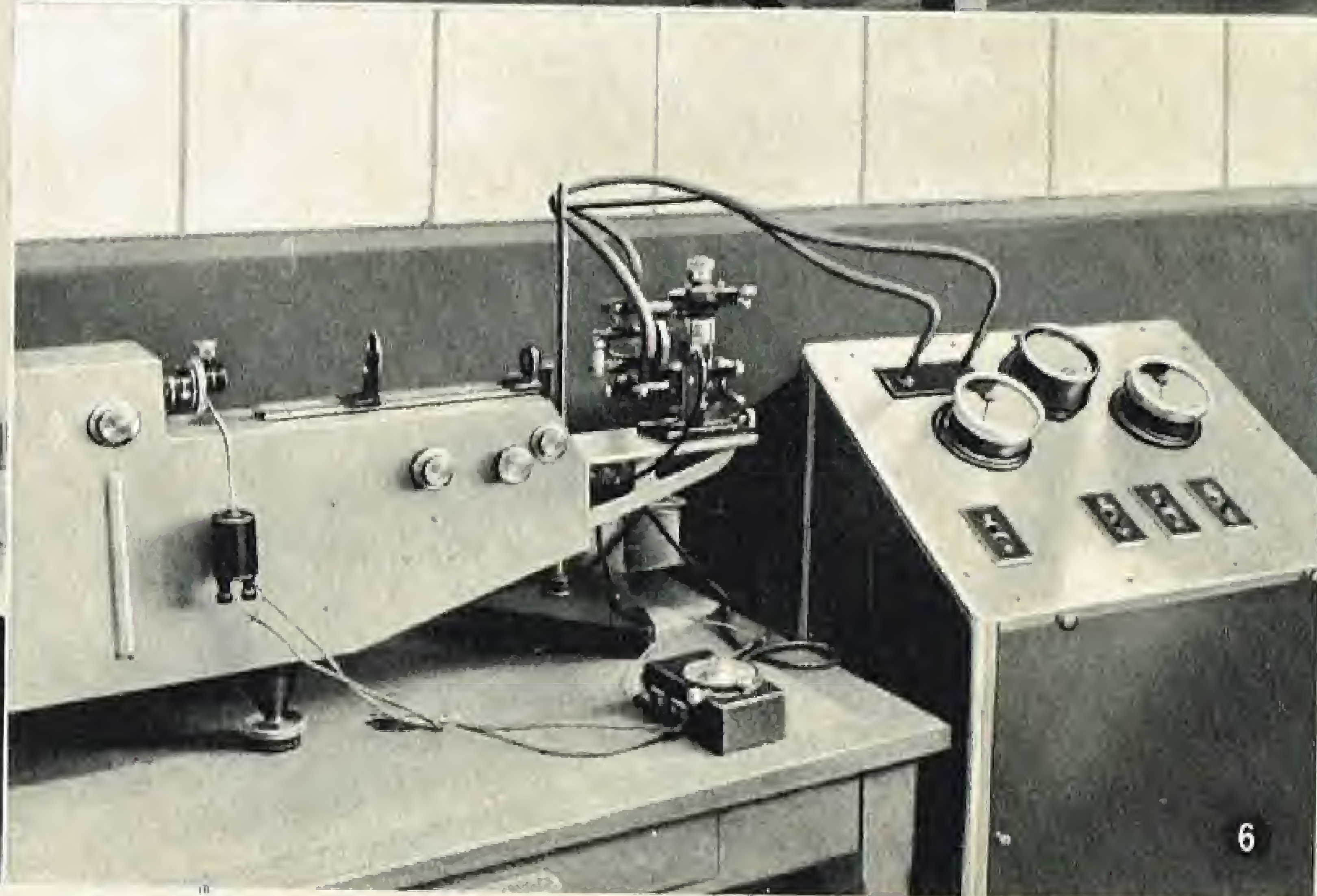












1. Espectrofotómetro de Vassy para la medida y el registro continuo de la opacidad de los clisés espectrográficos; 2. Medida de la dureza de los metales hasta 900°; 3. Medida de la resistencia de los metales (deformación y rompimiento) hasta 900°; 4. Vista general de un laboratorio de análisis químicos de los metales y de control de fabricación; 5. Máquina Chevenard para la medida de la dilatabilidad de los metales en función de la temparetura y con vistas a su análisis térmico; 6. Análisis cuantitativo de los metales por espectografía de emisión (Doc. Régie nationale Renault).

Paladio (Pd = 106,7) y compuestos

Reseña histórica. — Fue descubierto en 1803 por **Wollaston,** al mismo tiempo que el rodio, en el mineral de platino del Choco, en el que se encuentra en la proporción de 0,5%.

Estado natural. — Existe siempre en la mena del platino. Se obtiene puro, ya por vía seca (reducción del cloropaladito de amonio por el hidrógeno), ya por vía húmeda (reducción del cloruro paladioso por el formaldehído en presencia de un álcali).

Propiedades. — Se asemeja a la plata por sus propiedades físicas. Es el más fusible de los metales de la mena del platino, pues funde a 1 500° C. Muy maleable. D = de 11,4 a 12, según esté más o menos batido.

Calentado en el aire, se oxida superficialmente, cubriéndose con una capa de óxido PdO que se descompone a temperatura más elevada, y da el oxículo Pd_2O. Lo ataca el agua regia, dando Cl_2Pd, sal delicuescente. El paladio, incluso en forma compacta, absorbe más de 900 veces su volumen de hidrógeno. Forma con este elemento una aleación Pd_2H.

Es soluble en el ácido nítrico.

Compuestos del paladio. — Existen dos series de compuestos: los compuestos *paladosos* y los compuestos *paládicos*. Los primeros son los más estables.

Se han descrito tres *cloruros*: 1° ClPd, la existencia del cual es dudosa; 2° Cl_2Pd, que da con los cloruros alcalinos sales dobles Cl_2Pd, 2ClM, siendo M un metal; este cloruro se combina con el óxido de carbono, y da varios compuestos; 3°, Cl_4Pd, conocido solamente en los cloropaladatos alcalinos Cl_4Pd, 2ClM.

Existen tres *óxidos*: un *oxídulo* PdO, el *óxido paladoso* Pd_2O y el *óxido paládico* PdO_2. Solamente el óxido paladoso es básico.

Una clase de compuestos muy importante es la que forma con el amonio. Se conocen dos series de estos compuestos: los derivados del *paladoamonio*, tales como el cloruro, y los derivados del *paladodiamonio*. Proceden de la acción de sus ácidos sobre las sales correspondientes del paladodiamonio.

Las aminas, fosfinas y arsinas desempeñan un papel análogo.

Aplicaciones. — El paladio, aleado con el cobre, da aleaciones utilizadas en relojería para fabricar muelles antimagnéticos. Las sales paladosas son empleadas en la técnica fotográfica. Se utiliza también en joyería, como el platino.

Rodio (Rh = 102,91) y compuestos

Reseña histórica. — Metal raro de la mena del platino, fue descubierto por **Wollaston** (1803). Lo denominó rodio a causa del color rosa de sus sales. Este cuerpo fue estudiado por **Berzelius** y **Claus,** al mismo tiempo que el paladio; presenta grandes analogías con el *cromo* y el *cobalto*.

Propiedades. — Se asemeja al aluminio. Dúctil y maleable al rojo solamente. Más difícilmente atacable que el iridio y el platino por los agentes químicos. D = 12,1. Funde hacia 2 000° C; a esta temperatura se oxida superficialmente; es atacado al rojo oscuro por el cloro, y, en presencia de un cloruro alcalino, da un cloruro doble soluble. Inatacable por los ácidos y el agua regia, a no ser que esté aleado con otro metal. Sin embargo, el rodio precipitado es soluble en el ácido sulfúrico concentrado calentado a ebullición. La solución de sulfato de rodio, evaporada hasta eliminar el exceso de ácido y diluida a continuación en agua, da por reacción con la sosa el *óxido de rodio*, que, calentado a ebullición con sosa y alcohol, conduce a la separación del rodio metálico.

Compuestos del rodio. — El rodio posee un solo *cloruro* Cl_6Rh_2, cuya existencia sea real. Obtenido por acción del cloro al rojo, es anhidro e insoluble. Preparado por vía húmeda mediante la acción del ácido clorhídrico concentrado sobre el sesquióxido hidratado, forma, con los cloruros alcalinos, clororroditos cristalizados: Cl_6Rh_2, 6ClM y Cl_3Rh_2, 4ClM.

Óxidos. — El *sesquióxido* Rh_2O_3 es el único cuya existencia ha sido demostrada; es un polvo gris negruzco; hidratado, $Rh_2(OH)_6$, $2H_2O$, es un polvo amarillo soluble en los ácidos minerales. Los otros óxidos, hipotéticos, serían RhO, RhO_2. Solamente se conocen las sales oxigenadas, poco numerosas, derivadas del sesquióxido: sulfato, nitrato, nitrito.

Se conoce un rodocianuro: $[Rh_2(CN)_{12}]K_6$.

Los derivados amoniacales son muy numerosos. Joergensen ha mostrado su analogía con los derivados del cromo y del cobalto.

Se emplea una aleación Pt-Rh para la fabricación de pares termoeléctricos.

Rutenio (Ru = 101,1) y compuestos

Reseña histórica. — **Ossan** creyó haber descubierto en 1828, en el mineral de platino de los Urales, tres nuevos metales; uno de ellos fue denominado rutenio (de *rutene*, ruso), pero sus descubrimientos no fueron confirmados ulteriormente. **Claus**, en 1845, demostró la existencia de este metal. **Deville, Debray** y **Joly** lo estudiaron más tarde.

Propiedades. — Es el metal más raro de los de la mena del platino. Es separado de los demás metales que lo acompañan gracias a la volatilidad de su peróxido RuO_4.

De aspecto análogo al del platino, de densidad 11,0, es el menos fusible de los metales de la mena del platino, después del osmio. Se puede fundir solamente en el horno eléctrico, a condición de trabajar al abrigo del aire para evitar las pérdidas que se manifiestan si se forma el peróxido volátil.

Inoxidable en el aire en frío, se empaña al rojo vivo, y da lugar a la formación de dióxido y de peróxido a temperatura más elevada. Inatacable por los ácidos y por las mezclas de ácidos, es atacado por el cloro en caliente, y por el salitre y la potasa fundidos; con la potasa y el cianuro potásico, forma rutenocianuro $[Ru(CN)_6]K_4$. Cuando está finamente dividido, condensa los metales, al igual que los demás metales de la mena del platino. En cuanto a las propiedades químicas, es análogo al estaño.

Compuestos del rutenio. — Los *óxidos* más importantes son el dióxido RuO_2, sólido azul, y el peróxido RuO_4, sólido de color anaranjado.

Se conocen dos *cloruros*, Cl_6Ru_2 y Cl_4Ru, que dan, con los cloruros alcalinos, cloruros dobles cristalizados tales como Cl_6Ru_2, 4ClK y Cl_4Ru, 2ClK.

Los únicos compuestos bien definidos son los nitritos dobles: $(NO_2)_6Ru_2$, $6NO_2K$.

Existen numerosos derivados amoniacales.

Metales del grupo I b

Cobre y compuestos: Reseña histórica. Estado natural. Metalurgia. Propiedades. Aleaciones. Compuestos: Cloruro cuproso. Otros halogenuros de cobre I. Óxido cuproso. Sulfuro cuproso. Sulfucianuro cuproso y acetiluro cuproso. Cloruro cúprico. Óxido cúprico e hidróxido cúprico. Sulfuro cúprico. Sulfato cúprico. Nitrato cúprico. Carbonatos cúpricos. Acción fisiológica. Reconocimiento y determinación cuantitativa. — **Plata y compuestos:** Reseña histórica. Estado natural. Extracción. Propiedades. Aleaciones. Compuestos halogenados de la plata. Óxidos de plata. Otros compuestos. Reconocimiento y determinación cuantitativa. — **Oro y compuestos:** Reseña histórica. Estado natural. Extracción. Propiedades. Aleaciones. Compuestos del oro: Cloruros. Óxidos de oro. Reconocimiento y determinación cuantitativa

Los tres metales de este grupo, el cobre, la plata y el oro, son monovalentes, dándose la particularidad de que el cobre puede actuar igualmente como divalente, y el oro como trivalente. En el caso de pluralidad de valencias, los compuestos monovalentes son los menos estables. Por otra parte, cuando los elementos son monovalentes, sus sales producen al ionizarse soluciones incoloras, mientras que las combinaciones de cobre divalente dan soluciones azuladas, y las de oro trivalente, amarillentas.

El peso específico de los elementos de este grupo aumenta en función de la masa atómica; en cambio, los puntos de fusión y de ebullición son irregulares a este respecto.

Cobre (Cu = 63,54) y compuestos

Reseña histórica. — El cobre es conocido desde tiempos remotos; su nombre se deriva de *Cyperium*, denominación latina de la isla de Chipre. Una estatuilla de cobre puro, hallada en Caldea, y que data de 4 000 a. de J. C., constituye el objeto metálico más antiguo de los conocidos hasta hoy.

Estado natural. — Se encuentra en estado nativo principalmente a orillas del lago Superior, en los Estados Unidos, en donde, abigarrado, forma yacimientos muy ricos; se halla en estado de oxídulo Cu_2O o de carbonato CO_3Cu en Perú, Chile y los montes Urales; otros yacimientos importantes son los de Katanga, en el antiguo Congo Belga.

Los minerales más abundantes son el sulfuro de cobre SCu_2 (*calcosina*), y el sulfuro doble de hierro y cobre, S_3Fe_2, SCu_2 (*calcopirita*), que se encuentran en España (Río Tinto), México, Inglaterra, Alemania y Francia.

Metalurgia. — (V. METALURGIA, p. 354).

Propiedades. — El cobre es un metal de color rojo, dúctil, maleable y tenaz, de manera que se puede estirar en hilos muy finos y extender en láminas muy delgadas. Después de la plata, es el metal que conduce mejor el calor y la electricidad.

D = 8,90.

Funde a 1 100° C, y, calentado al rojo blanco, emite vapores que arden al contacto del aire y dan una llama verde.

El cobre es inalterable en una atmósfera de aire seco, pero si se expone al aire húmedo que contenga anhidrido carbónico, se cubre con una capa verde de hidróxido básico de cobre, denominada pátina, que protege el metal de ataques ulteriores. Calentado en presencia de aire se cubre con una capa negra de óxido de cobre, CuO.

Se combina con el cloro, el bromo, el yodo y el azufre.

El cobre posee un potencial electropositivo con respecto al hidrógeno, por lo que los ácidos débiles no lo atacan en ausencia de aire.

Reduce el ácido sulfúrico, transformándolo en ácido sulfuroso.

Con los ácidos débiles en presencia de aire e igualmente con los ácidos fuertes diluidos, se cubre con una capa verde de la sal de cobre correspondiente; todas estas sales son venenosas. Debe, pues, evitarse conservar los alimentos en recipientes de cobre.

En presencia de ácido nítrico da vapores nitrosos.

Aleaciones. — El cobre se une fácilmente a los metales y da aleaciones. Las principales son: el *latón* (67% de cobre, 33% de cinc), llamado también *latón amarillo*, más duro y más fusible que el cobre; el *latón blanco*, que contiene más de 50% de cinc aleado al cobre; la *plata nueva*, formada por cobre, cinc y níquel; el *constantán*, utilizado en las resistencias eléctricas, constituido por cobre y níquel.

Los *bronces* (cobre y estaño) tienen la ventaja sobre el cobre de ser más fusibles y forjables; además, no contienen burbujas (a diferencia del cobre), por lo que se utilizan para la fundición de diferentes objetos; campanas, estatuas, etc.

Compuestos. — Puesto que el cobre funciona como mono y divalente, distinguiremos los compuestos cuprosos y los compuestos cúpricos.

En general, las sales cuprosas son incoloras, mientras que las cúpricas son azuladas; las primeras tienen tedencia a oxidarse y a transformarse en las segundas. Ambas forman fácilmente complejos.

Cloruro cuproso. — De fórmula Cl_2Cu_2, constituye un polvo blanco, cristalino, poco soluble en el agua. En cambio, se disuelve bien en el amoniaco, dando una solución que absorbe bien el óxido de carbono; absorbe igualmente el acetileno, y da *acetiluro de cobre*, de color rojo.

Se obtiene tratando el cobre con ácido clorhídrico, lo que conduce a la formación de una disolución clorhídrica de cloruro cuproso. Cuando se vierte esta disolución en una masa importante de agua, se puede observar cómo se deposita en el fondo un precipitado blanco de la sal.

Otros halogenuros de cobre I. — El cobre da igualmente lugar a los compuestos F_2Cu_2, Br_2Cu_2 y I_2Cu_2, con el flúor, el bromo y el yodo, respectivamente. El más importante es el último, utilizado para aislar el yodo de las aguas madres del nitrato de Chile.

Óxido cuproso. — El *óxido cuproso*, u *oxidulo de cobre*, Cu_2O, es un polvo rojo, que puede ser preparado haciendo hervir una solución de acetato de cobre con azúcar. Se emplea para teñir de rojo el vidrio y para reconocer la presencia de azúcar en la orina (diabetes).

Sulfuro cuproso. — Este compuesto se presenta en estado nativo (*calcosina*).

Sulfocianuro cuproso (SCNCu) y acetiluro cuproso (C_2Cu_2). — Sirven, respectivamente, para la determinación cuantitativa del cobre y para el reconocimiento del acetileno.

Cloruro cúprico. — Se obtiene disolviendo el óxido de cobre en ácido clorhídrico. Cristaliza por enfriamiento, dando cristales verdes de Cl_2Cu, $2H_2O$.

Óxido cúprico (CuO), e hidróxido cúprico [$Cu(OH)_2$]. — El óxido se prepara por tostación del cobre en el aire, o por descomposición del nitrato. En presencia de substancias reductoras, pierde fácilmente oxígeno, por lo que se emplea en el análisis elemental de compuestos orgánicos.

El hidróxido se obtiene precipitando una sal de cobre con un álcali. Es un precipitado azul pálido, insoluble en exceso de álcali. Si, por el contrario se emplea amoniaco, el hidróxido formado se disuelve en exceso de reactivo, dando una solución azul.

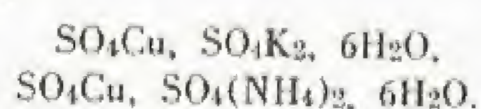
Sulfuro cúprico (SCu). — Se obtiene tratando una solución de una sal de cobre con sulfuro de hidrógeno; es un compuesto pardo negruzco.

Sulfato cúprico (SO_4Cu, $5H_2O$). — Se prepara por tostación de las piritas; cristaliza en paralelepípedos oblicuos, de bello color azul. Pierde el agua de cristalización a 200° C, transformándose así en un polvo blanco, que se vuelve instantáneamente azul al ponerse de nuevo en contacto con vestigios de agua, por lo que se le emplea para reconocer la presencia de agua en el alcohol.

Se utiliza igualmente en galvanoplastia, en tintorería y en agricultura.

La mezcla de soluciones de sulfato cúprico y arsenito potásico da un precipitado verde de arsenito de cobre (*verde de Scheele*).

El sulfato cúprico forma con los sulfatos de potasio y de amonio compuestos cristalizados isomorfos de los sulfatos dobles de la serie magnesiana, por ejemplo:



$$SO_4Cu,\ SO_4K_2,\ 6H_2O.$$
$$SO_4Cu,\ SO_4(NH_4)_2,\ 6H_2O.$$

Este último compuesto no debe ser confundido con el sulfato de cobre amoniacal que se obtendría al evaporar la solución amoniacal de hidróxido cúprico, cuya fórmula es:



$$Cu(OH)_2,\ 4NH_3,\ 3H_2O.$$

La solución de este cuerpo en el agua disuelve la celulosa (*licor de Schweitzer*).

Nitrato cúprico [$(NO_3)_2Cu$]. — Forma cristales azules delicuescentes. El papel impregnado en una solución acuosa de esta sal arde muy bien una vez seco.

Carbonatos cúpricos. — Se encuentran en estado nativo dos hidrocarbonatos de cobre:

La *malaquita*, CO_3Cu, $Cu(OH)_2$, en masas concrecionadas verdes; se puede cortar como el mármol, pulir y hacer de ella placas y objetos de arte. No presenta un color uniforme, sino que forma venas;

La *azurita*, $2CO_3Cu$, $Cu(OH)_2$, que se encuentra en la naturaleza en forma de cristales azules; por desprendimiento de anhídrido carbónico, se transforma en malaquita.

Acción fisiológica. — Ciertas sales de cobre son venenosas; en cambio, otras no solamente no lo son, sino que sirven como antídotos: así ocurre con el sulfato de cobre en los casos de intoxicación por el fósforo.

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — Es característico de las sales de cobre el formar soluciones azuladas al añadirles amoniaco. La determinación cuantitativa se realiza generalmente por electrólisis o por gravimetría, tras haber transformado la combinación correspondiente en sulfuro cuproso.

Plata (Ag = 107,88) y compuestos

Reseña histórica. — La plata (en latín, *argentum*) era ya conocida por los egipcios, que sabían separarla del oro en las aleaciones naturales, y que practicaban la metalurgia del metal puro, de sus aleaciones, etc. Los fenicios, los cartagineses y los romanos explotaron las minas de plomo argentífero de la Península Ibérica; los griegos, las minas de plata del Ática; los etruscos, las de la Península Italiana.

En realidad, los romanos fueron quienes se dieron a la búsqueda de todos los minerales de plomo argentífero en el mundo entero entonces conocido, pues consumían gran cantidad de plata.

En la Edad Media, los pisanos y los genoveses explotaron las minas de Cerdeña; las repúblicas de Lucania, Florencia y Venecia extrajeron la plata de Etruria.

En Germania se descubrieron numerosos filones, que hicieron de esta comarca el centro de producción de plata más importante, hasta que se descubrieron las minas de plata del Nuevo Mundo (Cortés en México, Pizarro en el Perú).

En 1557 se inventó en Potosí el tratamiento de los minerales argentíferos con el mercurio.

En 1859 se descubrieron las minas de plata de California.

Estado natural. — La plata se encuentra en estado nativo en el Lago Superior. Se halla igualmente, en estado de sulfuro SAg_2 (*argentita* o *argirosa*) y de sulfuros dobles formados con el arsénico y el antimonio (*rosicler claro*, *rosicler oscuro*). La contienen también en pequeña cantidad, ciertos minerales de metales usuales (cobre, plomo), de donde se puede extraer. Existen minas muy ricas en México, que es el primer productor del mundo, Bolivia, Perú y Chile; son también muy importantes los yacimientos de los Estados Unidos y Canadá.

Extracción. — (V. METALURGIA, p. 356). Se basa en la transformación del sulfuro de plata en cloruro, por acción de la sal marina; se obtiene también por desplazamiento mediante otro metal y combinación subsiguiente con el mercurio o con el plomo.

Propiedades. — Es un metal blanco puro, susceptible de ser pulimentado a la perfección. Es tenaz, muy dúctil y muy maleable. D = 10,5. Es el mejor conductor del calor y de la electricidad. Funde a 954° C, poco más o menos, y se volatiliza a una temperatura más elevada, produciendo vapores azules. En estado líquido, puede disolver un volumen de oxígeno aproximadamente veintidós veces superior al suyo propio, que se desprende bruscamente en el momento de la solidificación, fenómeno que constituye el galleo y que consiste en la aparición de excrecencias en la superficie del metal; se puede evitar este inconveniente añadiendo a la plata un poco de cobre.

No se combina con el oxígeno, cualquiera que sea la temperatura, y sí, en cambio, con los metaloides, en especial con los halógenos.

El ácido clorhídrico la ataca solamente hacia 500° C.

Se ennegrece superficialmente al ponerse en contacto con el ácido sulfhídrico, al cual descompone hacia 550° C.

El ácido sulfúrico la ataca y es reducida en caliente, produciendo en tal reacción anhídrido sulfuroso.

El ácido nítrico la ataca ya a la temperatura ordinaria dando nitrato de plata y vapores nitrosos. Los álcalis, incluso fundidos, no la atacan, por lo que se utilizan en los laboratorios crisoles de plata para este tipo de fusiones.

En fin, la plata es soluble en el cianuro potásico.

Aleaciones. — La plata se alea en todas las proporciones con el plomo, el oro y el cobre.

Las aleaciones con el cobre son las únicas usuales.

Las aleaciones *monetarias* contienen 835 y 900 partes de plata por 165 y 100 de cobre. Las aleaciones destinadas a la orfebrería contienen de 800 a 950 milésimas de plata. El oro verde consta de 700 partes de oro y 300 de plata.

Compuestos halogenados de la plata. — El *cloruro de plata*, ClAg, se encuentra en la naturaleza. Se obtiene en forma de precipitado muy parecido a la leche cuajada (precipitado caseoso) tratando una solución de nitrato de plata con ácido clorhídrico o con un cloruro soluble. El cloruro de plata es insoluble en el agua pura. Es ligeramente

soluble cuando el agua contiene sal marina en solución, ácido clorhídrico o nitrato de plata.
El cloruro de plata es soluble en el amoniaco y en el hiposulfito sódico.
El cloruro de plata funde a 260° C en una materia que adquiere la apariencia del cuerno (plata córnea) al enfriarse. Se descompone parcialmente por efecto de la luz en plata metálica y en cloro, que se desprende. En estas condiciones, la plata ennegrece; este fenómeno es utilizado en la técnica fotográfica.
El cloruro de plata, al que se han añadido unas cuantas gotas de ácido clorhídrico, se reduce a plata metálica en estado pulverulento cuando se pone en contacto con el cinc o el hierro.
El *bromuro de plata*, BrAg, se produce por acción de un bromuro alcalino sobre una solución de nitrato de plata. Es soluble en el amoniaco y en el hiposulfito sódico. La luz reduce este compuesto con mayor facilidad aún que el cloruro, por lo que es muy empleado en fotografía. Es un cuerpo blanco amarillento, insoluble en el agua.
El *yoduro de plata*, IAg, es amarillo y se produce por acción de un yoduro alcalino sobre una solución de nitrato de plata. Al igual que los precedentes, es alterable a la luz e insoluble en el agua. En cambio, no se disuelve en el amoniaco.
El *fluoruro de plata*, FAg, es soluble en el agua. Se prepara disolviendo el óxido de plata en el ácido fluorhídrico; los cristales obtenidos por evaporación corresponden al hidrato: FAg, H_2O.

Óxidos de plata. — Se conocen varios compuestos de la plata con el oxígeno: Ag_4O, Ag_2O, Ag_2O_2. El único interesante es el *protóxido* Ag_2O, que se obtiene cuando se vierte potasa en una solución de nitrato de plata. Es un polvo pardo, poco soluble en el agua, a la que comunica reacción alcalina, lo que establece un punto de semejanza entre la planta y los metales alcalinos. Puesto en contacto con el amoniaco, se transforma en un polvo negro que, una vez seco, detona al menor roce *(plata fulminante)*.

Otros compuestos. — El azufre y la plata se combinan por influencia del calor, dando *sulfuro de plata* (SAg_2. Este compuesto existe en la naturaleza, cristalizado *(argirosa)*. En forma de sulfuros dobles, constituye un mineral de plata. El hidrógeno lo reduce, y cuando la reducción es muy lenta, la plata se presenta en forma de filamentos *(plata filiforme)*.
El *nitrato de plata*, NO_3Ag, se obtiene disolviendo plata en ácido nítrico, en caliente. Cuando se concentra la solución, se deposita el nitrato en forma de cristales incoloros del sistema ortorrómbico. La sal es anhidra, soluble en el amoniaco y da cristales de una sal amoniacal de fórmula: NO_3Ag, $2NH_3$.
El nitrato de plata funde a 220° C, sin descomponerse: vaciado en moldes cilíndricos, se solidifica y da barras empleadas para las cauterizaciones con el nombre de *piedra infernal*. El nitrato de plata es, en efecto reducido fácilmente por las materias orgánicas, lo que le vale el ser utilizado como cáustico; al ser aplicado sobre la piel, la tiñe de negro. Es antiséptico.
Es reducido por la luz.
El nitrato de plata sirve para fabricar una tinta indeleble utilizada sobre todo para marcar la ropa; se emplea igualmente para platear espejos.
El *sulfato de plata*, SO_4Ag, es isomorfo del sulfato sódico anhidro; se prepara disolviendo plata en ácido sulfúrico concentrado, calentado a ebullición. Es poco soluble.
El *ortofosfato de plata*, PO_4Ag_3, es un precipitado amarillo limón que se obtiene por precipitación de un ortofosfato soluble en el nitrato; es soluble en el amoniaco. El *pirofosfato*, $P_2O_7Ag_4$, es un precipitado blanco formado por reacción del nitrato de plata con los pirofosfatos solubles; es soluble en el amoniaco.
El *fulminato de plata*, CNOAg, es un precipitado cristalino, blanco, que se puede obtener tratando la solución caliente de nitrato de plata con alcohol. La manipulación de esta sal es peligrosa, puesto que detona al menor choque; sirve para la confección de fulminantes de explosivos.

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — La formación de precipitado cuajoso de cloruro de plata sirve para el reconocimiento cualitativo y para la determinación cuantitativa de las sales de plata.

Oro (Au = 197,2) y compuestos

Reseña histórica. — El oro es conocido desde la Antigüedad: el Antiguo Testamento lo cita. Los alquimistas le comparaban con el sol y le atribuían las mayores virtudes, de manera que intentaron transformar en oro todos los metales comunes. Plinio y Vitruvio describieron las propiedades del oro. Plinio indicó, igualmente, la manera de dorar la madera y el mármol con panes de oro y de dorar el cobre por amalgamación. Las regiones que han suministrado oro han sido, sucesivamente, Asia Menor, Armenia, Lidia, Frigia (país de Creso y de Midas) y Nubia. Los romanos explotaron el Piamonte, Iberia y las Galias. En el siglo XV, se traía a Europa el oro en polvo procedente de las costas de África. En los siglos XVI y XVII, se explotaban ya los filones de México, Perú y Colombia; en el siglo XVII, los del Brasil; en el siglo XIX, los de California, Siberia, Australia y África del Sur (Transvaal).

Estado natural. — Se halla en estado nativo en los filones cuarzosos, en ciertos esquistos arcillosos y en los aluviones (placeres). Se encuentra en masas, en granos irregulares y en pajuelas que alcanzan, a veces, un peso de varios kilogramos *(pepitas, nuggets)*.

Extracción. — V. METALURGIA, p. 355.

Propiedades. — De bello color amarillo, el oro es rojo tras una serie de reflexiones, o verde por transparencia cuando se presenta en panes suficientemente delgados, y rojo púrpura cuando se halla en un estado de división avanzado, lo que ocurre por precipitación *(púrpura de Cassius)*. D = 19,5. Es muy maleable, de manera que se puede reducir a hojas de 1/10 000 de milímetro (panes de oro). Funde al rojo vivo a 1 064° C y emite vapores violeta a una temperatura más elevada. El oro cristaliza por enfriamiento en cubos más o menos modificados. Es inalterable al aire a todas las temperaturas. Ningún ácido lo ataca; únicamente el *agua regia* (mezcla de ácido clorhídrico y ácido nítrico) lo disuelve. El cloro y el bromo lo atacan en frío: el oro es el rey de los metales.

Aleaciones. — El oro no se emplea nunca solo por ser demasiado blando. En general, se le alea con el cobre, lo que le confiere una dureza mayor y disminuye al mismo tiempo su maleabilidad. Se le alea a veces con la plata. Las proporciones son las siguientes:

	ORO	COBRE
Monedas	900	100
Medallas	916	84
Orfebrería y alhajas	920	80
	840	160
	750	250

Las aleaciones de cobre y oro dan el *oro rojo*. Según las proporciones de la plata en las aleaciones de oro y plata, se obtiene el oro *blanco, amarillo o verde*.
El mercurio se alea con el oro en todas las proporciones; la amalgama formada se destruye por calentamiento.
El dorado con amalgama de oro se logra cubriendo el objeto con la amalgama y eliminando después el mercurio por el calor.
El dorado galvánico se obtiene por electrólisis de una solución de cloruro de oro en cianuro potásico.

Compuestos del oro. — Cloruros. — Se conocen el *protocloruro*, ClAu, y el *tricloruro*, Cl_3Au.
El *protocloruro* se forma cuando se calienta el tricloruro a 190° C. Es un polvo verde. Este compuesto emparenta el oro con los metales alcalinos.
El *tricloruro* se prepara disolviendo el oro en agua regia; por evaporación se obtienen cristales amarillos de una combinación de cloruro de oro y ácido clorhídrico, Cl_3Au, ClH. El ácido clorhídrico se elimina por el calor, y se obtiene así un polvo pardo de cloruro, soluble en el agua.
El cloruro forma con los cloruros alcalinos cloruros dobles cristalizados, por ejemplo: Cl_3Au, ClK, $2H_2O$.

Óxidos de oro. — Los compuestos oxigenados son el *óxido auroso*, Au_2O, y el *óxido áurico*, Au_2O_3.
El óxido áurico es un polvo pardo que se obtiene calentando el hidróxido Au(OH). Este hidrato funciona como ácido (*ácido áurico*) y da con los álcalis *auratos* solubles.
Al ponerse en contacto con amoniaco, el ácido áurico da un polvo gris que detona al menor choque (*oro fulminante*).

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — La formación de púrpura de Cassius mediante el cloruro de estaño permite reconocer la presencia de oro incluso cuando se trata de vestigios (0,00001 gramos/litro). La determinación cuantitativa se efectúa habitualmente por copelación de la muestra que se trata de analizar y plomo puro; al final de la fusión, el oro, puro, se separa fácilmente de la copela, y se pesa.

Metales del grupo II b

Cinc y compuestos: Reseña histórica. Estado natural. Extracción. Propiedades químicas. Cloruro de cinc. Óxido de cinc. Sulfuro de cinc. Sulfato de cinc (vitriolo de cinc). Carbonato de cinc. Reconocimiento y determinación cuantitativa. — **Cadmio y compuestos:** Reseña histórica. Extracción. Propiedades. Principales compuestos. — **Mercurio y compuestos:** Reseña histórica. Estado natural. Propiedades. Amalgamas. Aplicaciones. Compuestos del mercurio: Cloruros. Óxidos. Sulfuros de mercurio. Sulfatos de mercurio. Reconocimiento y determinación cuantitativa.

Los elementos de este grupo: cinc, cadmio y mercurio, presentan numerosas analogías entre sí. Son todos ellos divalentes; el mercurio, por su parte, puede funcionar como monovalente, siendo en tal caso sus sales menos estables que las divalentes. Los sulfatos, los cloruros y los nitratos de los tres metales son isomorfos. Tienen gran importancia desde el punto de vista técnico.

Cinc ($Zn = 65,38$) y compuestos

Reseña histórica. — En épocas antiguas, no se conocía el cinc aislado, sino en forma de aleación con el cobre y el estaño, que se obtenía tratando simultáneamente con carbón una mezcla de los minerales de estos metales o de óxido de cinc y cobre metálico. A principios de la Edad Media, se explotaba ya la mina de Moresnet; el mineral que se extraía se mezclaba con carbón y con cobre y conducía a la formación de latón. **Paracelso,** en el siglo XVI, dio su nombre al cinc. El procedimiento actual del tratamiento fue inventado por el abad **Dony,** químico de Lieja.

Estado natural. — Se le encuentra en forma de *calamina* (carbonato y silicato). La *smithsonita* es el carbonato de cinc. La *blenda* es su sulfuro. Se presenta también en forma de óxido.

Los minerales más abundantes se encuentran en los Estados Unidos y Australia.

Extracción. — Se extrae, ya del carbonato, ya del óxido o de la blenda (v. METALURGIA, p. 355).

Propiedades químicas. — Se empaña rápidamente en el aire (formación de carbonato en el aire húmedo). Sus vapores arden con llama fuliginosa y dan humos blancos de óxido. Descompone el agua hacia 100° C.

La mayor parte de los ácidos y de las soluciones alcalinas lo disuelven con desprendimiento de hidrógeno. El cinc *puro* es difícilmente atacable (teoría de la pila).

El ácido nítrico lo disuelve. El cinc desplaza la mayor parte de los metales de sus sales. Una placa de cinc introducida en una solución de sulfato de cinc se cubre con una capa de cobre metálico mientras que el sulfato de cinc formado permanece en solución.

Cloruro de cinc (Cl_2Zn). — Se obtiene por evaporación de la solución clorhídrica del metal. Si se evapora esta solución a fin de suprimir el exceso de ácido, se obtiene una masa siruposa de cloruro hidratado que pierde el agua de hidratación a temperatura más elevada. El cloruro anhidro funde a 250° C y se volatiliza al rojo.

Deshidratante enérgico, desinfectante (conservación de la madera), forma gran número de cloruros dobles. Disolviendo óxido de cinc en el cloruro líquido, y adicionando cierta cantidad de carbonato sódico, se obtiene un producto blanco, empleado en pintura (pintura al oxicloruro de cinc).

Óxido de cinc (ZnO). — Se puede obtener por combustión del metal, o por calcinación del hidróxido, el carbonato o el nitrato. El óxido destinado a la pintura, el *blanco de cinc*, se prepara en escala industrial calentando el metal en grandes retortas de tierra. Los vapores de óxido son arrastrados por una corriente de aire y se condensan en cámaras tapizadas de tela. La pintura al óleo al blanco de cinc no ennegrece como el albayalde y es inofensiva, aunque *cubre* menos que el albayalde. Calentado, el óxido, absolutamente blanco a la temperatura ordinaria, se vuelve amarillo, y pasa de nuevo a blanco por enfriamiento. No es fusible ni volátil; se conduce como un óxido indiferente: se obtiene el hidróxido $Zn(OH)_2$, precipitando una sal soluble de cinc con un álcali. El precipitado blanco gelatinoso que se forma se disuelve en un exceso de álcali, y en esta reacción el óxido se conduce como un ácido.

Sulfuro de cinc (SZn). — Se encuentra en la naturaleza: blenda y wurtzita. Se obtiene precipitando las soluciones de las sales de cinc con sulfuro de hidrógeno. Este precipitado es blanco y fluorescente. En esta forma, sirve de elemento de base en la preparación de ciertas pinturas luminosas. El sulfuro de cinc es, con el sulfuro de germanio, el único de color blanco.

Sulfato de cinc (vitriolo de cinc, SO_4Zn). — Obtenido por evaporación de la solución del metal o del carbonato en ácido sulfúrico, puede cristalizar con 7, 5, 4 ó 2 moléculas de agua.

El compuesto $SO_4Zn, 7H_2O$ es isomorfo del sulfato de magnesio. Estos cristales, incoloros, se eflorecen en el aire y se transforman en sulfato monohidratado.

Se emplea en la industria de la tintorería.

Carbonato de cinc (CO_3Zn). — Precipita hidratado cuando se trata de una sal de cinc con un carbonato alcalino. El carbonato de cinc natural (smithsonita) cristaliza en romboedros como los carbonatos de calcio (espato), de magnesio y de hierro.

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — Las sales de cinc forman un precipitado blanco de $[Fe(CN)_6]Zn_2$ al ser tratadas con ferrocianuro potásico. Para la determinación cuantitativa, se precipita el hidróxido, que por calcinación pasa a óxido, en cuyo estado se pesa.

Cadmio ($Cd = 112,41$) y compuestos

Reseña histórica. — El cadmio fue descubierto en 1817, simultáneamente por **Stromeyer** y **Hermann.** Su nombre procede de *cadmia*, antigua denominación del cinc, al que acompaña en todos sus minerales.

Extracción. Propiedades. — Es un metal blanco, blando, maleable, de densidad 8,6; funde a 315° C y hierve a 770° C.

Es soluble en los ácidos. Se extrae del sulfuro natural, que acompaña a los minerales de cinc.

Principales compuestos. — *Cloruro de cadmio*, Cl_2Cd, *bromuro de cadmio*, Br_2Cd, y *yoduro de cadmio*, I_2Cd. Se obtienen por disolución del metal en los ácidos correspondientes. El yoduro de cadmio forma grandes tabletas anacaradas, solubles en el alcohol.

Óxido de cadmio, CdO. Se obtiene por combustión del metal en el oxígeno: es un polvo amarillo más o menos obscuro según la temperatura de la reacción.

Sulfuro de cadmio, SCd. Es un polvo de bello color amarillo *(amarillo de cadmio)*, empleado en pintura. Se obtiene haciendo pasar una corriente de sulfuro de hidrógeno en la solución de una sal de cadmio.

Las *sales oxigenadas* de cadmio, casi todas solubles en el agua, son incoloras, de sabor metálico desagradable y vomitivas.

El cadmio posee un espectro caracterizado por una raya roja, simple, utilizada como referencia en espectroscopia. Se emplea en la fabricación de células fotoeléctricas y, depositado en capas tenues por vía electrolítica, para proteger ciertas piezas metálicas contra la corrosión.

Mercurio ($Hg = 200,61$) y compuestos

Reseña histórica. — Los fenicios, los griegos y los romanos explotaron ya los yacimientos de mercurio, y más tarde los árabes en la Edad Media. El mineral fue denominado *kenabare* por los romanos, y luego *cinabris* (bajo latín). El metal se llamó *hidrargirio (plata fluida)* o mercurio porque los griegos lo habían dedicado al dios Mercurio, como el oro al Sol y la plata a la Luna. Las minas de Almadén se explotan desde la época del emperador Carlos V.

Estado natural. — El mineral de mercurio es el sulfato *(cinabrio)*. La mayor parte del mercurio extraído en el mundo procede de Almadén, en España, y de Idria, en Carniola; son también importantes las minas de Toscana. Más del 40% de la producción mundial procede de España. Existe también en California.

Propiedades. — Es el único metal líquido a la temperatura ordinaria; es de color blanco de plata y constituye un espejo perfecto. Se solidifica a — 40° en una masa de color blanco grisáceo, maleable.

Metal muy pesado: D = 13,596 a 0° C.

Hierve a 357°,25 y da vapores incoloros; emite vapores a la temperatura ordinaria. En el aire, se cubre con una capa grisácea de oxídulo. A la temperatura de ebullición, se cubre con una capa de pajuelas rojas de óxido HgO (precipitado *per se*).

El ácido clorhídrico no lo ataca por debajo de 300° C. El cloro lo ataca en frío; el azufre se combina con el metal a temperatura relativamente baja.

Amalgamas. — El mercurio se alea con muchos metales. Estas mezclas reciben el nombre de amalgamas. Se pueden obtener, ya directamente, ya indirectamente, por adición de mercurio a las soluciones salinas, por acción del metal sobre una sal de mercurio, etc.

Las amalgamas se destruyen al ser calentadas (el mercurio destila).

Aplicaciones. — El mercurio es empleado en gran número de instrumentos de física: termómetros, barómetros, etc. Sirve también para la extracción del oro y la plata, por amalgamación.

Se emplea en la fabricación de explosivos *(fulminato de mercurio)*.

Compuestos del mercurio. — El mercurio da lugar a dos clases de compuestos: *mercuriosos* y *mercúricos*, según que el elemento funcione como mono o divalente.

Cloruros. — El *cloruro mercurioso* (calomelanos), Cl_2Hg_2, es un polvo blanco, insoluble en el agua, que puede ser obtenido mezclando una solución de sal mercúrica con otra de sal común. Se puede preparar por vía seca, calentando en un matraz de vidrio, en un baño de arena, una mezcla de sal común y sulfato mercurioso. Como es muy empleado en medicina como purgante, debe estar completamente exento de dicloruro. Se purifica por destilación.

El *cloruro mercúrico*, Cl_2Hg, se prepara calentando (como para la preparación del calomelanos) sulfuro mercúrico y sal en un matraz de vidrio. El cloruro o sublimado corrosivo se sublima en cristales pequeños blancos, solubles en el agua calentada a ebullición; se deposita formando agujas que pueden alcanzar una longitud de un centímetro.

Esta sal es un veneno violento. Se emplea a la dosis de 1/4 de miligramo a un miligramo como antiséptico. Coagula las materias albuminoideas y las vuelve imputrescibles.

Los bromuros y yoduros mercuriosos y mercúricos tienen propiedades análogas a los cloruros correspondientes.

El yoduro mercúrico, I_2Hg, rojo a la temperatura ordinaria, pasa a amarillo a 150° C. Recupera el color primitivo espontáneamente por enfriamiento o cuando se frota con un cuerpo sólido; este cambio de color obedece a una modificación de la estructura cristalina.

Óxidos. — Existen dos óxidos: Hg_2O *(óxido mercurioso)* y HgO *(óxido mercúrico)*.

El primero es un polvo negro obtenido al tratar una solución de una sal mercuriosa con otra de potasa.

El óxido mercúrico (precipitado *per se*) se presenta en forma de pajuelas rojas.

Por vía húmeda: precipitación de una sal mercuriosa por la potasa; es amarillo, pero a 300° C se vuelve rojo; calentado a temperatura superior, se descompone en mercurio y oxígeno.

Se emplea en oftalmología y sirve para preparar pomadas dermatológicas.

Sulfuros de mercurio. — El *sulfuro mercurioso*, SHg, es un precipitado negro obtenido por la acción del sulfuro de hidrógeno sobre una solución de una sal mercuriosa.

Una variedad del *sulfuro mercúrico*, HgS, es el bermellón, polvo rojo empleado en pintura. La combinación del azufre y el mercurio se realiza directamente al calentar una mezcla de azufre, mercurio, potasa y agua. El sulfuro mercúrico obtenido por precipitación es negro.

Sulfatos de mercurio. — El *sulfato mercurioso*, SO_4Hg_2, se obtiene calentando el mercurio con un exceso de ácido sulfúrico. Es muy poco soluble en el agua.

El *sulfato mercúrico*, SO_4Hg, se obtiene, igualmente, calentando el mercurio con ácido sulfúrico, pero evaporando la solución hasta que la mayor parte del exceso de ácido sulfúrico se evapore.

El sulfato neutro, SO_4Hg, se descompone por el agua en sulfato tribásico amarillo SO_4Hg, $2H_2O$.

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — Ambas operaciones pueden ser realizadas precipitando el mercurio en forma de cloruro (mercurioso o mercúrico). La determinación cuantitativa se efectúa sobre el cloruro mercúrico, que puede ser obtenido, eventualmente, por reducción del cloruro mercurioso, cuando se trata de una sal en la que el mercurio es monovalente.

El mercurio metálico se reconoce fácilmente por su volatilidad.

Metales del grupo III b

Galio e Indio: Reseña histórica. Propiedades. Reconocimiento. — **Talio y compuestos:** Reseña histórica. Aplicaciones. Reconocimiento.

Son tres: galio, indio y talio. Como el aluminio, son trivalentes, pero a diferencia de este elemento, pueden funcionar igualmente como mono y divalentes.

Los tres metales del grupo colorean la llama.

Galio (Ga = 69,72) e indio (In = 114,76)

Reseña histórica. — El galio (de *gallus*, gallo) fue descubierto en 1875 por **Lecoq de Boisbaudran,** en la blenda de Pierrefitte, coronando así los trabajos de investigación guiados por una serie de consideraciones teóricas que había emitido juntamente con **Mendeleev.** El indio fue descubierto en 1863 por **Reich** y **Richter** en la blenda de Fleiberg; fue denominado así porque su espectro presenta una raya de color índigo característico.

Propiedades. — Estos dos metales están presentes en proporción ínfima en los minerales de cinc, con el germanio; el galio funde a 30°,8 C; D = 5,88.

Es un metal líquido a las temperaturas próximas a la temperatura ambiente.

Las propiedades del galio son bastante parecidas a las del aluminio.

El indio se asemeja mucho al cinc. Es un metal blanco de plata, dúctil, blando, de densidad 7,4, fusible a 176° C.

Entre otras aplicaciones, sirven para formar amalgamas utilizadas en ciertos empastes para dientes.

Reconocimiento. — La mejor manera de reconocerlos es por espectroscopia, en la que manifiestan rayas de longitud de onda bien característica.

Talio (Tl = 204,39) y compuestos

Reseña histórica. — El talio fue descubierto en 1861 por **Crookes,** como resultado de las observaciones espectroscópicas realizadas con los barros de las cámaras de ácido sulfúrico de Tilkeroede, en el Harz, **Lamy** consiguió aislarlo y lo estudió en 1862.

Es blando, denso, rápidamente oxidable.

Se parece al plomo; así se puede cortar con un cuchillo; es muy maleable y poco tenaz.

D = 11,86. Rechina como el estaño cuando se le pliega. Fusible a 288° C.

Es un elemento muy difundido, que puede ser obtenido en el tratamiento industrial de las piritas y las blendas.

Un mineral, la *crookesita*, contiene 18 % del metal, junto a silicio y cobre.

Existen sales talosas y tálicas; así, el cloruro taloso, ClTl, y el cloruro tálico, Cl_3Tl. Las sales talosas son estables, mientras que las sales tálicas se descomponen con el agua.

Aplicaciones. — Las aleaciones talio-plomo son muy apreciadas por tener un punto de fusión elevado. Las aleaciones talio-plomo-estaño sirven como material de revestimiento en las cubas electrolíticas. Se saca partido de las propiedades tóxicas de los compuestos de talio en la lucha contra los insectos y las ratas (jarabe de talio mezclado con almidón y glicerina).

El cloruro y el sulfato de talio son apreciados como agentes preservativos (mildiu, madera, cuero).

En la industria de las lámparas eléctricas con filamento de tungsteno, se recurre a introducir en la bombilla una sal de talio, a fin de eliminar los últimos vestigios de gas.

El óxido y el nitrato son utilizados como catalizadores en la hidrogenación del lignito a presión.

El oxisulfuro de talio es adoptado por sus propiedades fotoconductoras en una célula, sucedánea de la célula de selenio.

El bencilato y el feniletilato de talio sirven como antidetonantes en los motores de combustión interna.

En fin, las sales de talio son utilizadas como colorantes en la industria del vidrio, y como factores de incremento del índice de refracción.

Reconocimiento. — Las sales de este elemento se caracterizan por presentar una raya verde muy brillante.

Metales del grupo IV b

Germanio y compuestos: Reseña histórica. Estado natural. Propiedades. Compuestos. — **Estaño y compuestos:** Reseña histórica. Estado natural. Extracción. Propiedades. Compuestos del estaño: Compuestos estannosos. Óxido de estaño. Acción fisiológica. Aplicaciones. Reconocimiento y determinación cuantitativa. — **Plomo y compuestos:** Reseña histórica. Estado natural y propiedades. Metalurgia del plomo. Aplicaciones. Compuestos del plomo: Protóxido. Minio. Bióxido de plomo, superóxido de plomo. Sales oxigenadas de plomo. Sulfato de plomo. Nitrato de plomo. Carbonato de plomo. Acción fisiológica. Reconocimiento y determinación cuantitativa

Los metales de este grupo: germanio, estaño y plomo, son tetravalentes, como el carbono, y pueden además presentar la valencia dos; la estabilidad de las sales tetravalentes de los elementos del grupo decrece con el peso atómico, mientras que la estabilidad de los compuestos divalentes aumenta, hasta el punto que las combinaciones divalentes del plomo son más estables que las tetravalentes.

El germanio presenta además numerosas propiedades características de los metaloides, por lo que es considerado frecuentemente como semimetal.

Germanio (Ge = 72,60) y compuestos

Reseña histórica. — Descubierto en 1885 por **Winkler** en la *argirodita*, mineral que lo contiene en estado de elemento esencial, y que es un sulfogermaniato de plata con una proporción de germanio del orden de 7%. Su fórmula es S_2Ge, $3SAg_2$. Se extrae de las blendas, en las que se encuentra junto al galio.

Estado natural. — Es un elemento muy difundido en la naturaleza, aunque se encuentra siempre en cantidades infinitesimales.

Su extracción se basa en el hecho de que el cloruro de germanio es volátil y, en estas condiciones, es arrastrado por el ácido clorhídrico.

Propiedades. Compuestos. — El germanio metálico es un cuerpo gris, fusible hacia 900° C, volátil al rojo vivo, sublimable en un polvo negro al abrigo del aire, fácilmente atacable por los ácidos. Estas propiedades generales lo emparentan a la vez con el *silicio* y con el *estaño*.

Tetravalente en las combinaciones más estables, forma fluosales, tales como GeF_6K_2, isomorfa del fluosilicato de aluminio; un tetrafluoruro, GeF_4, análogo a SiF_4; un óxido, GeO_2, soluble en los álcalis con producción de *germaniatos*.

Se asemeja al estaño por la posibilidad de reducción que presenta el óxido y por la existencia de un sulfuro GeS_2 insoluble en los ácidos. Como el sulfuro de cinc, este sulfuro es blanco; estos dos casos son los únicos en los que un sulfuro ofrece tal color.

Estaño (Sn = 118,70) y compuestos

Reseña histórica. — El estaño es conocido desde la más remota Antigüedad; la Sagrada Escritura y Homero lo citan. En la época de Plinio, se utilizaba para cubrir los objetos de cobre y latón.

Estado natural. Extracción. — El principal mineral es el óxido de estaño, SnO_2, llamado *casiterita*. Los principales países productores son Bolivia, México y, en oriente, la India y Malasia. Una vez seleccionado el mineral, se lava y tuesta para eliminar los cuerpos extraños (As, S). Lavado y tostado de nuevo, se trata con carbón a fin de reducirlo y, por último, se refina. (V. METALURGIA, p. 355.)

Propiedades. — Es un metal blanco, muy maleable. Se puede reducir a hojas muy finas (papel de estaño); pero es poco tenaz. Cuando se dobla una barra de estaño, emite un ruido particular conocido con el nombre de *grito del estaño*, debido a su textura fibrosa cristalina. El estaño posee un ligero olor particular que impregna las manos cuando se manipula.

D = 7,29. Funde a 231° C. Es el más fusible de los metales usuales.

Se puede poner de manifiesto la estructura cristalina del estaño solidificado lavando la superficie con ácido clorhídrico.

El estaño no es volátil; hierve a cerca de 2 000° C. No se oxida a la temperatura ordinaria, pero arde al rojo vivo y se transforma en dióxido, SnO_2.

Los álcalis lo disuelven en caliente; el óxido formado se combina con los álcalis y da estannatos. Al estaño divalente corresponden estannitos.

Se combina en frío con los halógenos.

El ácido nítrico lo ataca con violencia a la temperatura ordinaria; el ácido sulfúrico diluido y caliente lo disuelve lentamente.

Compuestos del estaño. — Compuestos estannosos. — El *cloruro estannoso*, Cl_2Sn, se forma por acción del ácido clorhídrico seco sobre el estaño. Con el agua, da cloruro estannoso hidratado, Cl_2Sn, H_2O. Este cuerpo se disuelve sin descomponerse en el agua que contiene ácido clorhídrico.

Es un reductor enérgico. Quita las manchas de orín en la ropa, pues reduce el sesquióxido de hierro y lo disuelve al estado de cloruro. Se emplea en tintorería.

El *cloruro estánnico*, Cl_4Sn, es preparado por acción de una corriente de cloro seco sobre el estaño caliente.

Es un líquido incoloro que hierve a 120° C, desprendiendo vapores blancos. Se combina con el agua y da un hidrato, $Cl_4Sn, 4H_2O$.

Óxidos de estaño. — Con el oxígeno forma dos compuestos:

El *óxido estannoso*, SnO, de color pardo oliva, negro o rojo, según las condiciones de formación. Este compuesto arde en el aire cuando se le calienta, dando el dióxido, SnO_2;

El *óxido estánnico*, SnO_2, que existe en la naturaleza en forma cristalizada: es la *casiterita*, mineral de estaño. Se obtiene artificialmente por calcinación del estaño en el aire. Da lugar a dos hidratos: el ácido estánnico, SnO_3H_2, y el ácido metaestánnico, $Sn_5O_{11}H_2, 4H_2O$. Las sales estannosas tienen reacción ácida y poseen un sabor especial; las sales estánnicas son en general bastante inestables.

Existen dos *sulfuros*: el sulfuro estannoso, SSn, y el sulfuro estánnico, S_2Sn. Éste se emplea para broncear artificialmente el hierro y el yeso. Durante largo tiempo, se ha empleado para enlucir las almohadillas de las máquinas eléctricas.

Acción fisiológica. — El estaño, exento de plomo y de las sales de este elemento, no es venenoso. Las soldaduras de las latas de conservas no deben contener plomo.

Aplicaciones. — Se emplea para la fabricación de utensilios domésticos, y para el estañado del hierro y el cobre. Forma aleaciones de gran interés práctico (v. COBRE, p. 305). Algunas de sus sales son utilizadas para el teñido de telas.

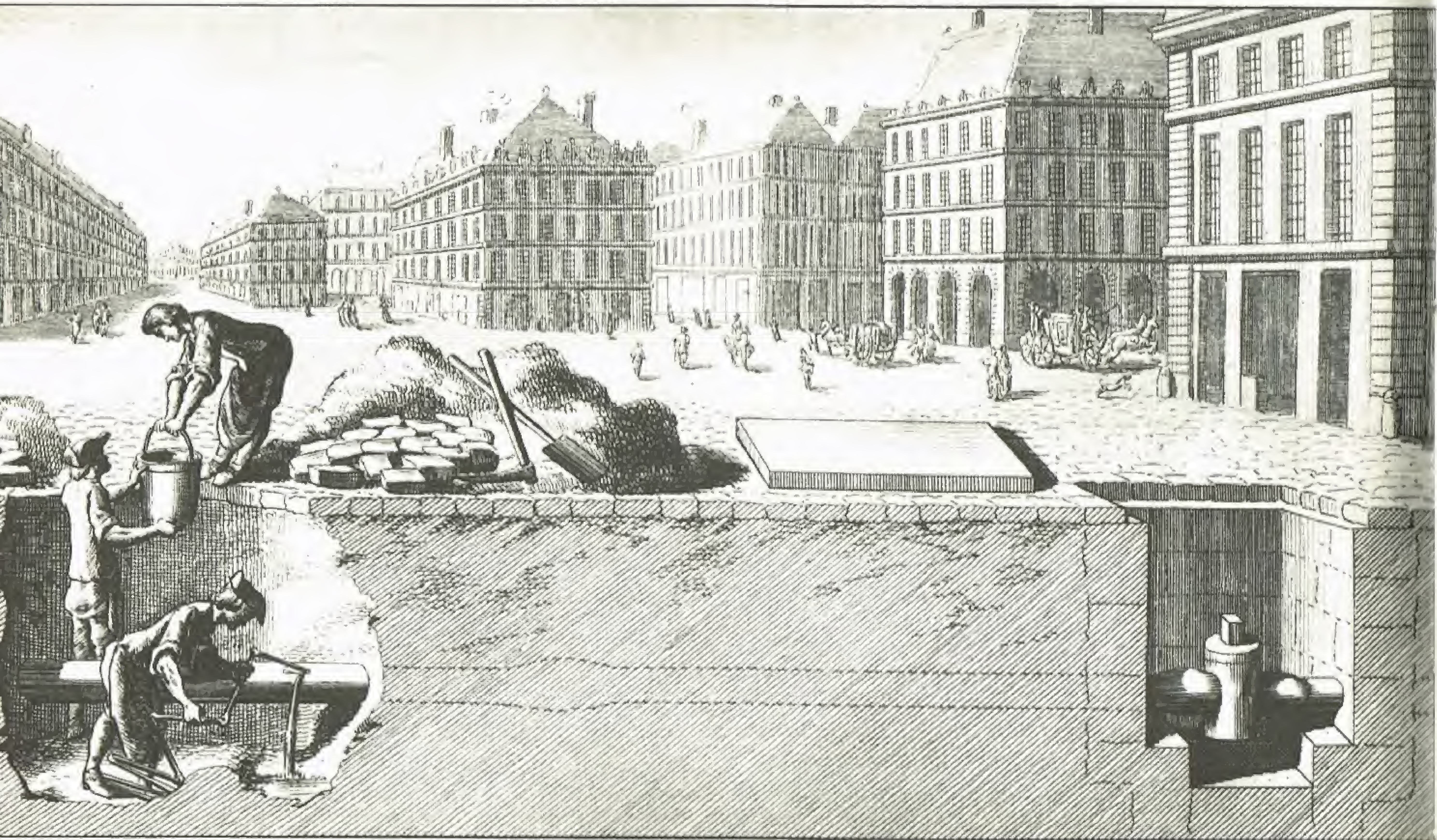
Reconocimiento y determinación cuantitativa. — Se le reconoce por formar un precipitado de azul de Turnbull, característico. La determinación cuantitativa se efectúa por peso del óxido SnO_2.

Plomo (Pb = 207,21) y compuestos

Reseña histórica. — El plomo es conocido desde tiempos inmemoriables. En Babilonia, las piedras de los puentes se trababan unas con otras mediante garfios de hierro empotrados en plomo. Los romanos explotaban en España y en Bretaña las minas de plomo argentífero, muy importantes. En la Edad Media se empezó a preparar el blanco de plomo, o albayalde, atacando el plomo con vinagre.

Estado natural y propiedades. — Se encuentra en la naturaleza en estado de sulfuro *(galena)*, de carbonato *(cerusita)* y de sulfato *(anglesita)*; el carbonato es isomorfo del carbonato cálcico *(aragonita)* y de los carbonatos de estroncio y de bario, lo que emparenta el plomo con los metales alcalinotérreos. Entre los países mayores productores de este metal se encuentran los Estados Unidos, México y Australia.

El plomo es un metal gris azulado, de brillo metálico cuando se corta, que se empaña en el aire debido a la formación de óxido; blando, se raya con la uña; dúctil y maleable; poco tenaz y nada elástico.



Trabajos de canalización de plomo: Fontanero (Descripción de artes y oficios por la Real Academia de Ciencias de Francia [1760-1780], lám. VIII) [Fot. Larousse]

D = 11,33. Funde a 327° C y hierve a 1 525° C, emitiendo a esta temperatura vapores tóxicos. La oxidación es rápida cuando el metal está fundido, y se forma en este caso protóxido de plomo.

El agua destilada no ejerce acción alguna sobre el plomo; en cambio, el agua que contiene aire da lugar a la formación de un hidrocarbonato ligeramente soluble. Las cañerías de plomo son inofensivas porque las aguas de los manantiales y de los ríos que conducen, que contienen sulfatos solubles, forman un sulfato insoluble que cubre el metal con una capa protectora. En cambio, el agua de lluvia que cae sobre los tejados de plomo es peligrosa, pues las sales de plomo son tóxicas.

El ácido clorhídrico lo ataca solamente a ebullición. El ácido sulfúrico de menos de 60° Baumé lo ataca apenas, por lo que se emplea en la fabricación del ácido sulfúrico (cámaras de plomo). Concentrado y caliente, forma sulfato de plomo con desprendimiento de anhídrido sulfuroso.

Metalurgia del plomo. — V. METALURGIA, p. 354.

Aplicaciones. — El plomo reducido a láminas sirve para cubrir tejados y las paredes de las cámaras de fabricación del ácido sulfúrico. Se emplea para la confección de canalizaciones de agua y de gas de alumbrado, y para la fabricación de acumuladores (v. METALURGIA, página 354).

Se alea fácilmente con la mayor parte de los metales. Con el antimonio, se obtiene la aleación de los caracteres de imprenta; con el estaño, la aleación para las soldaduras de los fontaneros. Los perdigones de caza son de plomo endurecido con una pequeña cantidad de arsénico.

Compuestos del plomo. — Con los halógenos, el plomo forma: con el flúor, F_2Pb, polvo blanco; con el cloro, Cl_2Pb, que precipita (casi insoluble en frío) cuando se trata la solución de una sal de plomo con ácido clorhídrico o con un cloruro soluble. Blanco, soluble en los hiposulfitos alcalinos y en el agua hirviendo. Funde al rojo y se solidifica en una masa translúcida parecida al cuerno, que se puede cortar con un cuchillo. Se emplea en pintura con el nombre de *amarillo de Cassel* y *amarillo de Turner*. Al calentar el clorhidrato amónico con un exceso de minio se obtienen oxicloruros de plomo. El cloruro Cl_4Pb es conocido solamente en solución. La solución amarilla es un oxidante enérgico.

Se conocen también el bromuro Br_2Pb, análogo al cloruro Cl_2Pb, y el yuduro I_2Pb, precipitado amarillo.

El *sulfuro de plomo*, SPb (negro), es la *galena*, mineral abundante de plomo. Sirve para barnizar los artículos de alfarería.

Protóxido (PbO). — Se produce por oxidación del plomo fundido en el aire. El óxido que se obtiene antes de alcanzar la temperatura de fusión es el *masicote amarillo*; fundido, es el *litargirio*: escamas cristalinas, amarillas o rojizas según la temperatura de enfriamiento.

Se obtiene el hidróxido de plomo, 2 PbO, H_2O, añadiendo potasa a una sal de plomo.

Minio (Pb_3O_4). — El litargirio pulverizado se transforma en el aire a 300° C y da Pb_3O_4, polvo de color rojo escarlata, muy empleado en pintura para preservar el hierro del orín y en cristalería para fabricar cristal y esmaltes.

Bióxido de plomo, superóxido de plomo (PbO_2). — Se obtiene calentando minio con ácido nítrico. Es un cuerpo pardo cristalino, muy denso: D = 9 aproximadamente.

Es un oxidante enérgico. Se disuelve en los álcalis y forma plumbatos cristalizados; así, por ejemplo, el plumbato potásico, PbO_3K_2.

Sales oxigenadas de plomo. — Estas sales de plomo, incoloras, de sabor astringente, son muy tóxicas. Las principales son las siguientes.

Sulfato de plomo (SO_4Pb). — Precipita cuando se añade ácido sulfúrico o un sulfato soluble a una solución de una sal de plomo. Precipitado blanco. Existe en la naturaleza, cristalizado *(anglesita)*.

Nitrato de plomo [$(NO_3)_2Pb$]. — Se obtiene por acción del ácido nítrico sobre el plomo.

La solución diluida del nitrato, precipitada por una solución de bicromato potásico, da *cromato de plomo*, CrO_4Pb, amorfo, de color amarillo. Se emplea para la impresión de tejidos con el nombre de *amarillo de cromo*.

Carbonato de plomo (CO_3Pb). — Se encuentra en la naturaleza *(cerusita)*. En la industria, se utiliza el *albayalde*, que es un hidrocarbonato de plomo, $Pb(OH)_2$, $2CO_3Pb$, en general mezclado con carbonato neutro en proporciones variables. El albayalde *cubre* muy bien y se emulsiona fácilmente con el aceite de linaza. Debido al peligro grave de intoxicación al que están expuestos los obreros que lo fabrican, varios países han prohibido su utilización para pintar edificios. Así su empleo se ha limitado a usos más restringidos, como la pintura artística o las juntas de albayalde. Se prepara por acción del ácido carbónico, ya sobre el plomo en presencia de ácido acético (procedimiento holandés), ya sobre el subacetato de plomo (procedimiento de Clichy).

El albayalde es insoluble en el agua natural, pero es soluble en el agua que contiene anhídrido carbónico a concentración elevada. Calen-amarillo. Se emplea para la impresión de tejidos con el nombre de minio, un poco de óxido y un poco de carbonato.

Acción fisiológica. — Ya hemos indicado anteriormente el peligro que suponen las intoxicaciones a base de plomo.

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — El plomo se reconoce por formar un precipitado blanco de sulfato, que, a diferencia del sulfato de bario, se disuelve en tartrato amónico. La determinación cuantitativa se efectúa por gravimetría de este mismo sulfato.

Metal del grupo V b

Bismuto y compuestos: Reseña histórica. Estado natural. Extracción. Propiedades. Principales compuestos: Compuestos del cloro. Compuestos oxigenados. Reconocimiento y determinación cuantitativa

Bismuto (Bi = 209) y compuestos

Reseña histórica. — Conocido por los alquimistas en el siglo XVI, quienes suponían que se trataba de una plata de mala calidad o de una especie de plomo, fue estudiado por **Pott** (1739), **Neumann, Hellot, Dufay, Geoffroy le Jeune** (1735) y **Davy** (1812). **Lagerhjelm** estudió sus compuestos oxigenados.

Estado natural. Extracción. — El bismuto es un elemento poco abundante, que se encuentra ya en estado nativo, ya en estado de sulfuro S_3Bi_2 *(bismutita)*, y la mayor parte de las veces asociado con sulfuros y arseniuros de níquel, cobalto, plomo, plata, etc. El principal país productor de este metal es Bolivia. El mineral se somete a la tostación, y la materia así oxidada se funde con carbón, hierro (destinado a absorber el azufre restante) y una mezcla de carbonato sódico y sílice como fundente. El bismuto funde y se separa.

Para purificarlo, se disuelve en ácido nítrico. Se precipita el plomo con ácido sulfúrico y el bismuto con agua, lo que conduce a la formación de subnitrato de bismuto, que se reduce.

Propiedades. — El bismuto es el único elemento metálico de este grupo; todos los demás se conducen como metaloides. Es un metal blanco y brillante, con reflejos rojos, duro y quebradizo, poco sonoro. D = 9,82. Funde a 270° C.

Conduce mal el calor. Cristaliza con gran facilidad. Aumenta de volumen al solidificarse, propiedad particular que comparte con el agua.

Se emplea en diversas aleaciones, a causa de la fusibilidad que comunica a los demás metales. Con el plomo y el estaño, la aleación resultante funde por debajo de 100° C (aleaciones Darcet, Newton, Rose, Wood).

El ácido nítrico lo disuelve, formando nitrato. Los ácidos clorhídrico y sulfúrico lo atacan difícilmente. Calentado suficientemente en el aire, arde y da el óxido Bi_2O_3.

Principales compuestos. — **Compuestos del cloro.** — Se conocen los cloruros Cl_2Bi y Cl_3Bi.

Compuestos oxigenados. — Se conocen varios compuestos oxigenados: el óxido Bi_2O_3 y el anhídrido bismútico Bi_2O_5 son los más importantes.

El primero forma con el ácido nítrico una combinación importante: el nitrato de bismuto $(NO_3)_3Bi$, $5H_2O$. Al disolverse en el agua, se deposita un polvo cristalino blanco, el subnitrato de bismuto $(NO_3)(OH)_2Bi$, utilizado para la preparación de cosméticos.

Existen dos sulfuros, S_2Bi y S_3Bi_2 *(bismutita)*.

Reconocimiento y determinación cuantitativa. — Los compuestos de bismuto se caracterizan por formar sales básicas blancas, insolubles. La determinación cuantitativa se efectúa precipitando el carbonato básico, que ulteriormente se transforma en óxido Bi_2O_3.

Metal del grupo VI b

Polonio (Po = 210) y compuestos

Es el único elemento del grupo que presenta propiedades metálicas. Sus sales ofrecen numerosas analogías con las de los homólogos del azufre.

Es inestable; forma parte de una serie de isótopos radiactivos.

Se conocen varias sales de polonio tetravalente, que se hidrolizan fuertemente, y, además, un hidróxido y un hidruro.

D. TOMBECK, F. BOULANGER y X. MARTÍNEZ GARAYGORDOBIL



Cristales de ácido hipúrico o benzoilglicocol, $C_6H_5CONH.\ CH_2.\ CO_2H$ (Microfotografía tomada con luz polarizada). El ácido hipúrico resulta teóricamente de la condensación del ácido benzoico y del glicocol $C_6H_5 - COOH + HNH - CH_2 - CO_2H \rightarrow C_6H_5 - CO - NH - CH_2 - CO_2H + H_2O$ *(Fot. C. Bille)*

Química orgánica

Historia. — Ciertos principios que actualmente forman parte del campo abarcado por la química orgánica eran ya conocidos en épocas remotas; nos limitaremos a citar la obtención de bebidas alcohólicas por fermentación de zumos azucarados procedentes del reino vegetal, cuya práctica data de la prehistoria; la extracción de varios colorantes naturales de los reinos vegetal y animal, igualmente anterior a nuestra era; la destilación de las bebidas alcohólicas, ya conocida en la Edad Media, etc.

Sin embargo, la química orgánica no existe como ciencia hasta poco antes de fines del siglo XVIII.

Tras la obtención del óxido de cacodilo por **Cadet** (1760) a partir del acetato potásico y el anhídrido arsenioso, se asiste en la segunda mitad del siglo XVIII a la aparición de diferentes compuestos del carbono. Entreviendo la extensión que podían alcanzar estos compuestos, **Bergmann** propuso en 1777 la subdivisión de la química descriptiva en "orgánica" e "inorgánica", la cual fue adoptada inmediatamente.

Los descubrimientos de **Lavoisier** echaron los cimientos de esta nueva rama de la química. Este sabio demostró que los vegetales están constituidos principalmente por carbono, hidrógeno y oxígeno, mientras que **Berthollet** probó, poco después, que los animales están integrados por estos mismos elementos y, además, por nitrógeno. En esa misma época, los investigadores se afanaban por aislar los principios inmediatos de los vegetales. La aplicación de las leyes de la química mineral dio un nuevo impulso a la química orgánica. De entonces datan los primeros ensayos de análisis de las substancias animales y vegetales y de escindirlas en sus principios elementales. **Chevreul** (1786-1899) introdujo este nuevo método en la ciencia y pudo así demostrar que las grasas están constituidas por una mezcla indefinida de un número pequeño de principios definidos, de los cuales los principales son la tripalmitina, la triestearina y la trioleína.

Otros trabajos definieron el procedimiento requerido para conseguir el *análisis elemental*, que determina la composición de los principios inmediatos propiamente dichos, su densidad de vapor y su equivalente. Lavoisier procedió a la determinación ponderal de los elementos contenidos en las substancias orgánicas: carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, e indicó el método para la determinación cuantitativa del carbono y el hidrógeno, que consiste en quemar las substancias orgánicas, es decir, por oxidación. En 1788 logró quemar azúcar, así como varias resinas, utilizando óxido de mercurio como agente oxidante.

Posteriormente se recurrió a otros comburentes: bióxido de plomo (Berzelius), clorato potásico (Gay-Lussac y Thénard), óxido de cobre (Gay-Lussac). Las reglas que permiten determinar los equivalentes y las masas moleculares de las substancias orgánicas son las mismas que las de la química inorgánica (Berzelius y Gay-Lussac).

El estudio de los resultados obtenidos por los análisis elemental e inmediato permitió a los químicos hacerse una idea definitiva sobre la constitución de los principios que forman parte integrante de los seres vivos; sin embargo, no arrojaba luz alguna sobre la naturaleza de las fuerzas que mantienen unidos dichos principios ni sobre la manera de reconstituirlos.

Se pensó entonces en someter los compuestos naturales a descomposiciones graduales y en provocar la reacción de los productos de degradación así obtenidos.

Estas descomposiciones graduales se realizaron mediante calor (con o sin álcalis), oxidación, fermentaciones, acciones de contacto. **Liebig** (1803-1873) y **Woehler** (1800-1882) emitieron la hipótesis de la existencia de *radicales*, es decir, de agrupamientos atómicos o "restos" inalterables en una serie de combinaciones, susceptibles de ser reemplazados por un equivalente de un cuerpo más sencillo (1837). En esta misma época, Dumas generalizaba las observaciones de Gay-Lussac, Faraday, Liebig y Woehler, y emitía la teoría de las *substituciones*.

Hacia 1850, Gerhardt (1816-1856) estudió el desarrollo de las fórmulas de acuerdo con las reacciones químicas y expuso la teoría de los *tipos* (amina derivada del tipo amoniaco, alcohol, del tipo agua, etc.).

Entretanto, las teorías químicas adquirieron un nuevo desarrollo, debido especialmente al descubrimiento de los polialcoholes por **Berthelot** (1854), que introdujo la noción de función múltiple en la química orgánica.

Kekulé (1829-1896) emitió la hipótesis de la tetravalencia del carbono y admitió que los átomos de carbono pueden enlazarse mutuamente y formar cadenas abiertas o cerradas. En 1886, propuso una fórmula hexagonal para representar el benzol. **Van't Hoff** sugirió la adopción de una fórmula tridimensional de los cuerpos, es decir, una fórmula en el espacio y no ya en un plano, lo que permitía explicar

el poder rotatorio que manifiestan numerosos compuestos orgánicos. Las fórmulas de los cuerpos adquirieron entonces su aspecto definitivo, que refleja la posición relativa de los átomos en una molécula y define así las formas isómeras (enantiomorfas) de un mismo compuesto.

A partir de 1855, la química orgánica recibe un nuevo impulso, debido a la síntesis. En efecto, se había creído durante largo tiempo que la elaboración de las substancias orgánicas requería el concurso de una fuerza vital. Pero Woehler realizó en 1828 la síntesis de la urea a partir de sus constituyentes minerales, echando por tierra tal teoría.

Berthelot mostró el camino que conduce a la elaboración de las substancias orgánicas por síntesis. Así, reprodujo los principios de las grasas, efectuó la síntesis del alcohol a partir del etileno (1855), la del ácido fórmico (1856), la del metano (1858) y la del acetileno (1862). En 1860 pudo ya proceder por vez primera a una clasificación del conjunto de los compuestos orgánicos entonces conocidos en ocho tipos fundamentales o funciones.

La clasificación actual ha adquirido su aspecto definitivo después del Congreso de Ginebra (1892). La síntesis orgánica adquiere una importancia cada vez mayor: se han reproducido sucesivamente los ácidos de las frutas, los aceites esenciales, las grasas, los compuestos activos de farmacia. De entre los descubrimientos más importantes del siglo XIX citaremos los de la *alizarina* (**Graebe** y **Liebermann**, 1869), el *índigo* (**Baeyer**), la *vanillina* (1874), etc. (v. COLORANTES, p. 367; PERFUMES, p. 368, etc.).

El siglo XX ha visto una abundancia tal de trabajos sobre la constitución de los cuerpos y las síntesis, que la lista sería interminable; recordemos algunos de los más salientes: descubrimiento de las sales de alcohilmagnesio (**Grignard**, 1901); esclarecimiento de la constitución, aislamiento y síntesis de las vitaminas (a partir de 1926); aislamiento y síntesis de numerosas hormonas (a partir de 1926); preparación del primer compuesto orgánico con deuterio (**Urey**, 1932); aislamiento del 3,4 - benzopireno, producto cancerígeno (**Cook**, 1933); reconocimiento de los virus como compuestos orgánicos (**Stanley**, 1935); descubrimiento de la acción terapéutica de la penicilina (estudiada por **Fleming** en 1928), que ha dado lugar al descubrimiento sensacional de los antibióticos; desarrollo de la química de las macromoléculas, etcétera (v. PLÁSTICOS, p. 363).

Generalidades

Preliminares: Objeto de la química orgánica. Origen de los cuerpos orgánicos. Fisonomía particular de los compuestos orgánicos. Composición de los cuerpos orgánicos. Análisis cualitativo de los elementos. Análisis cuantitativo: Determinación cuantitativa del carbono y el hidrógeno (método de Liebig). Determinación cuantitativa del nitrógeno (método de Dumas). Determinación cuantitativa de los halógenos, el azufre y el fósforo (método de Carius). Determinación cuantitativa del oxígeno. Fórmula bruta (o molecular) de un compuesto. — **Constitución de los cuerpos orgánicos:** Insuficiencia de la fórmula bruta. Fórmulas de constitución. Principio de la constancia de las valencias. Enlaces múltiples. Radicales. Fórmulas semidesarrolladas. Valencia de los radicales. Naturaleza de las valencias en los compuestos orgánicos. — **Cadenas carbonadas. Series homólogas. Funciones:** Hidrocarburos alifáticos. Series homólogas. Hidrocarburos de cadena ramificada. Hidrocarburos saturados de cadena cerrada. Idea de la substitución. Átomo de carbono y grupos funcionales. Aplicación de estas nociones: butanos y alcoholes butílicos. — **Principales funciones orgánicas:** Funciones monovalentes. Funciones divalentes. Funciones trivalentes. Cuerpos de funciones múltiples. Compuestos cíclicos. — **Isomería. Tautomería. Polimería:** Tipos diversos de isomería. Fórmulas en el espacio o estereoquímicas. Isomería geométrica. Isomería óptica. Propiedades de los antípodas. Racémicos. Origen de los cuerpos activos. Isomerización. Tautomería. Polimería. — **Plan de estudio de los cuerpos orgánicos:** Serie alifática. Serie cíclica

Preliminares

Objeto de la química orgánica. — La **química orgánica** tiene por objeto el estudio de los compuestos del **carbono** producidos por los seres vivos u obtenidos por síntesis. El número de tales compuestos es elevadísimo; por otra parte, se distinguen netamente por sus propiedades de las combinaciones de los demás elementos. Estas dos razones justifican ampliamente que se les atribuya uno de los grandes capítulos de la química descriptiva.

Los compuestos **inorgánicos** constituyen el otro capítulo de la química descriptiva, la **química mineral** o inorgánica, en la que se incluyen además el óxido de carbono, el anhídrido carbónico y ciertas sales, tales como los carbonatos, que se conducen como compuestos minerales aunque contienen carbono en su molécula.

Origen de los cuerpos orgánicos. — Durante largo tiempo, los cuerpos orgánicos se originaban *exclusivamente* a expensas de los seres **organizados,** animales o vegetales. Este hecho contribuyó a acreditar una opinión errónea, según la cual la intervención de la vida era indispensable para elaborar la materia orgánica.

La realización de **síntesis** orgánicas a partir de cuerpos puramente minerales ha echado por tierra esta hipótesis (teoría de la "fuerza vital"). Actualmente, la mayor parte de los compuestos orgánicos pueden ser obtenidos por vía sintética.

Sin embargo, son numerosas las síntesis que no han desbordado el marco del laboratorio, pues la industria prefiere en ciertos casos recurrir a los *procedimientos de extracción:* tal ocurre con el almidón, el azúcar, la celulosa, las grasas, la gelatina, el caucho, la morfina, etc. Los productos secundarios de la destilación de la hulla y la madera son derivados de substancias naturales organizadas.

Las materias así extraídas pueden ser sometidas a transformaciones ulteriores: así, el alcohol se deriva de la fermentación de zumos azucarados, la glicerina se obtiene por desdoblamiento de las grasas, y los cuerpos que se separan del alquitrán de hulla constituyen la base de un número considerable de compuestos.

En cambio, ciertas síntesis, tales como las del metanol y el ácido acético, pueden competir desde el punto de vista económico con los procedimientos extractivos correspondientes.

Fisonomía particular de los compuestos orgánicos. — Gracias a la facultad extraordinaria que poseen los átomos de carbono de soldarse unos con otros en las moléculas, se puede considerar que el número de combinaciones orgánicas es prácticamente ilimitado.

Hasta hoy, se ha logrado aislar más de 600 000 compuestos de carbono, y la síntesis permite obtener constantemente otros cuerpos nuevos.

Todas las combinaciones del carbono se **descomponen** a temperaturas más o menos elevadas, cosa que no ocurre en la química mineral; además, son susceptibles de **arder** al ponerse en contacto con el aire.

Mientras que la mayor parte de los cuerpos inorgánicos son sólidos difícilmente fusibles, los compuestos orgánicos son generalmente **líquidos** a la temperatura ordinaria (en unos pocos casos gaseosos), y cuando se presentan en estado sólido, tienen un **punto de fusión** relativamente bajo. Muchos de los cuerpos orgánicos pueden ser **destilados.** La destilación a la presión ambiente o en vacío constituye un medio de purificación muy difundido en química orgánica, mientras que es excepcional en química mineral.

El *agua,* que es el disolvente ordinario de los compuestos minerales, encuentra un empleo muy limitado en química orgánica, pues son muy numerosas las substancias que no se disuelven en ella de manera apreciable; en cambio, se utilizan los llamados **disolventes orgánicos,** entre los cuales los más corrientes son el alcohol, el éter, los hidrocarburos (benceno, gasolina, etc.).

Al contrario de lo que sucede con los cuerpos minerales, son contados los casos en los que los compuestos orgánicos se *electrolizan.* Además, las **reacciones** de estos compuestos requieren un tiempo que a veces es considerable y no son casi nunca **totales,** pues las reacciones secundarias ponen generalmente trabas a la consecución de la reacción principal.

Composición de los cuerpos orgánicos. — Junto con el carbono, el **hidrógeno** es un componente universal de los cuerpos orgánicos (salvo en un número ínfimo de excepciones).

Después del carburo y el hidrógeno, el **oxígeno** es el elemento que más veces se encuentra; a continuación viene el **nitrógeno.** El **azufre** y los **halógenos** *(flúor, cloro, bromo, yodo)* se encuentran sobre todo en ciertos compuestos artificiales. El **fósforo** y el **arsénico** son mucho más excepcionales. Los **metales** se hallan en particular en las sales de ácidos orgánicos, así como en ciertos compuestos, llamados organometálicos, que se obtienen por síntesis.

Análisis cualitativo de los elementos. — Generalmente, la naturaleza *orgánica* de un compuesto se pone fácilmente de manifiesto por su aspecto, por la facilidad con que se descompone y por su combustibilidad.

De todas maneras, no es difícil caracterizar la presencia de los elementos fundamentales que componen la materia orgánica.

El **carbono** se investiga calentando la substancia con un poco de óxido de cobre: se observa un desprendimiento de anhídrido carbónico que enturbia una solución de hidróxido cálcico.

Esta misma reacción sirve para reconocer el **hidrógeno,** que se oxida, formando agua. En general, no se busca sistemáticamente la presencia de este elemento, puesto que entra en la composición de la inmensa mayoría de los cuerpos orgánicos.

La presencia de **oxígeno** se descubre calentando al rojo la substancia orgánica en una corriente de hidrógeno y conduciendo la mezcla gaseosa sobre una masa de contacto en la que se forma agua. Este método sirve igualmente para la determinación cuantitativa del oxígeno.

El **nitrógeno,** el **azufre** y los **halógenos** se investigan simultáneamente calentando una muestra de la substancia con un trozo pequeño de sodio. En estas condiciones, el nitrógeno forma el cianuro, el azufre origina el sulfuro, y los halógenos dan lugar a los halogenuros *(cloruro, bromuro, yoduro)* de sodio.

Se disuelve en agua la masa fundida así obtenida, y se divide la solución en varias fracciones, en las que se caracterizan por separado el cianuro, mediante formación de azul de Prusia; el sulfuro, por desprendimiento de sulfuro de hidrógeno, y los halogenuros, por precipitación en forma de sales de plata.

Análisis cuantitativo. — El análisis cuantitativo constituye una operación fundamental en los laboratorios de investigaciones orgánicas, puesto que, junto con la determinación de la masa molecular, permite establecer la fórmula bruta (o molecular) de un compuesto obtenido por síntesis.

En la substancia, que debe estar exenta de toda impureza, se pueden analizar cuantitativamente por diversos métodos:
el carbono y el hidrógeno (en una operación única);
el nitrógeno;
los halógenos, el azufre o el fósforo;
el oxígeno.

Determinación cuantitativa del carbono y el hidrógeno (método de Liebig). — Se introduce una masa conocida de la substancia que se desea analizar en un tubo difícilmente fusible, que lleva interiormente y en una parte de su longitud una capa de óxido de cobre, y se calienta al rojo, haciendo pasar al mismo tiempo por el interior del tubo una corriente de oxígeno puro.

En estas condiciones, la materia orgánica se volatiliza o descompone. Los vapores arden al ponerse en contacto con el óxido de cobre, que se reduce parcialmente.

El *hidrógeno* se transforma cuantitativamente en agua, y el *carbono* en anhídrido carbónico.

Los gases procedentes de la combustión atraviesan entonces el aparato de absorción (previamente averiado), que contiene cloruro cálcico y en donde el agua queda retenida. El anhídrido carbónico pasa a continuación por un segundo aparato de absorción lleno de cal sodada, en donde es captado.

Del aumento de peso de los aparatos de absorción se deducen por un cálculo sencillo los pesos de hidrógeno y carbono contenidos en la muestra de ensayo, lo que permite determinar la composición centesimal de la substancia.

Determinación cuantitativa del nitrógeno (método de Dumas). — Si se pone en contacto la substancia con óxido de cobre y se eleva la temperatura con el fin de obtener la combustión, el nitrógeno se libera cuantitativamente en estado gaseoso. La operación se lleva a cabo mediante calentamiento al rojo de un tubo análogo al precedente.

Los gases de la combustión son expulsados por una corriente de anhídrido carbónico y son recogidos en una probeta graduada (eudiómetro o nitrómetro) sumergida en una solución de potasa. El anhídrido carbónico es absorbido por la solución; se mide el volumen de nitrógeno en el eudiómetro, lo que permite determinar la proporción de este elemento en la muestra.

Determinación cuantitativa de los halógenos, el azufre y el fósforo (método de Carius). — Cuando se calienta en un tubo herméticamente cerrado, y en contacto con ácido nítrico, una substancia orgánica que contiene uno de esos elementos, el **halógeno** forma cuantitativamente el *halogenuro de plata* correspondiente (para lo cual es preciso introducir además previamente un exceso de nitrato de plata).

La determinación cuantitativa de los halógenos puede efectuarse también calentando la substancia con cal viva. Se originan así los halogenuros de calcio, que luego se precipitan en forma de sales de plata (Liebig).

El **azufre** pasa a formar ácido sulfúrico, y éste se precipita en forma de sulfato de bario.

El **fósforo** se oxida en ácido fosfórico, y éste se determina cuantitativamente por uno cualquiera de los métodos clásicos.

Determinación cuantitativa del oxígeno. — El método consiste en provocar la combustión de la substancia sin el concurso exterior de oxígeno. En estas condiciones, se forma una mezcla de óxido de carbono y anhídrido carbónico que se hace pasar sobre una superficie de carbón calentado al rojo con el fin de reducirla íntegramente a óxido de carbono. El CO se determina cuantitativamente mediante I_2O_5, o bien se vuelve a oxidar a CO_2 y luego se pesa este gas (Véase también más arriba lo dicho al tratar del análisis cualitativo del oxígeno).

Fórmula bruta (o molecular) de un compuesto. — La fórmula bruta de un cuerpo orgánico se deduce de la composición centesimal, determinada por análisis, y del valor de la masa molecular.

Supongamos que el análisis de una combinación constituida únicamente por carbono, hidrógeno y oxígeno arroja la composición siguiente:

carbono, 39,7%; *hidrógeno*, 6,5%.

Se deduce, por diferencia, que la proporción de *oxígeno* es de 53,8%.

Sabiendo que C = 12, H = 1, O = 16, se puede calcular que el número de *átomos-gramo* de carbono contenidos en 100 g de substancia es

$$\frac{39,7}{12} = 3,31.$$

El número de átomos-gramo de hidrógeno es $\frac{6,5}{1} = 6,5$.

El número de átomos-gramo de oxígeno es $\frac{53,8}{16} = 3,36$.

Por lo tanto, se puede atribuir provisionalmente al compuesto la fórmula


$$C_{3,31}\,H_{6,5}\,O_{3,36}.$$

Se trata ahora de hallar el número por el que habrá que multiplicar o dividir el valor de los coeficientes así determinados para que los nuevos coeficientes sean números enteros. Si se dividen por 3,31 los coeficientes de la fórmula arriba expuesta, se obtienen respectivamente los cocientes 1, 1,93 y 1,02.

Si se tienen en cuenta los errores inherentes a toda experiencia, se podrá atribuir al compuesto la fórmula CH_2O, o un múltiplo entero de la misma.

Si la determinación (por crioscopia) de la masa molecular indica, por ejemplo, un valor aproximado de 172, es indudable que debe adoptarse la fórmula $C_6H_{12}O_6$, cuya masa molecular exacta es 180.

Constitución de los cuerpos orgánicos

Insuficiencia de la fórmula bruta. — La fórmula bruta es insuficiente en la mayoría de los casos para caracterizar un cuerpo orgánico. Así, el ácido acético (ácido con olor a vinagre), el aldehído glicólico (sólido de sabor azucarado) y el formiato de metilo (líquido muy móvil, volátil, con olor a ron) responden a la misma fórmula: $C_2H_4O_2$, y sin embargo estos tres cuerpos son completamente diferentes. Se trata en este caso del fenómeno de isomería: se llaman isómeros los cuerpos que tiene la misma fórmula bruta (es decir, la misma composición química).

Fórmulas de constitución. — Puesto que la fórmula bruta es poco precisa, hay que recurrir a esquemas capaces de poner en evidencia la *disposición de los átomos en el seno de la molécula*. Las representaciones de este tipo se llaman **fórmulas de constitución** o **fórmulas desarrolladas.**

El establecimiento de la fórmula de constitución es al mismo tiempo la base y la culminación del estudio de una especie orgánica; en efecto, **las propiedades de los cuerpos dependen únicamente de la estructura de la molécula y son independientes de las circunstancias en las cuales se originan.**

Principio de la constancia de las valencias. — La solución del problema planteado por las fórmulas desarrolladas se basa inicialmente en el principio siguiente, confirmado por la experiencia (salvo en un número ínfimo de excepciones).

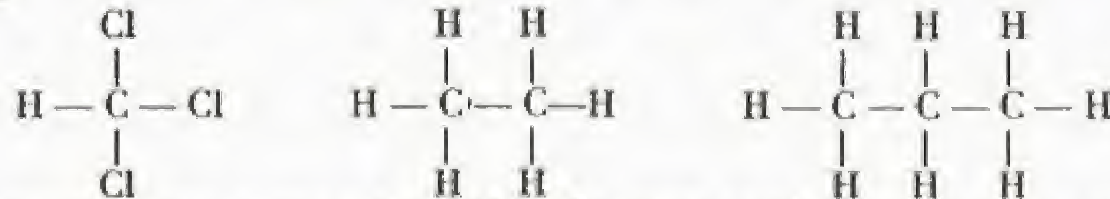
En los compuestos orgánicos, el átomo de **carbono** es siempre **tetravalente;** los átomos de **hidrógeno** y los de los **halógenos** *(flúor, cloro, bromo, yodo)* son **monovalentes;** el átomo de **oxígeno** es **divalente,** y el átomo de **nitrógeno, trivalente.**

Una vez admitidas estas reglas, el esquema o los esquemas que se derivan de una fórmula bruta se establecen escribiendo todos los símbolos de los átomos que constituyen la molécula y enlazándolos por un número de trazos equivalente al de las valencias que intercambian (v. QUÍMICA GENERAL, *Covalencias*, p. 250).

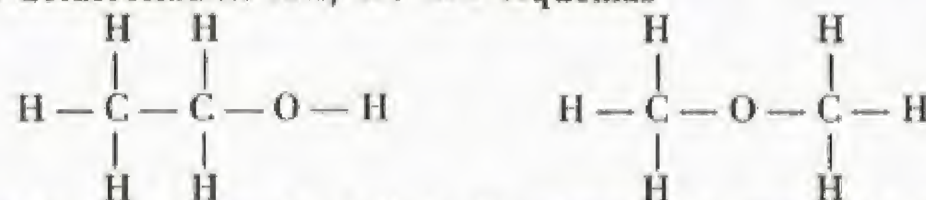
Así, el átomo de carbono constará de cuatro *enlaces*, el de oxígeno de dos, el de hidrógeno o de cloro de uno, etc.

Ocurre en un número muy limitado de casos que a una fórmula bruta dada corresponde un solo esquema.

Por ejemplo, a los compuestos $CHCl_3$ (cloroformo), C_2H_6 (etano), C_3H_8 (propano) no pueden corresponder más que las fórmulas siguientes:



Generalmente, a una misma fórmula bruta pueden corresponder varias fórmulas desarrolladas. Así, los dos esquemas



corresponden a la fórmula C_2H_6O. El número de posibilidades aumenta rápidamente cuanto mayor es el número de átomos de la molécula.

Debemos decir aquí que no siempre se conocen los cuerpos que corresponden a las fórmulas desarrolladas posibles; sin embargo, **se puede asignar a cada cuerpo conocido uno de los esquemas compatibles con las reglas de la valencia.**

Por otra parte, jamás se han podido preparar compuestos cuya fórmula bruta es incompatible con las representaciones de este tipo.

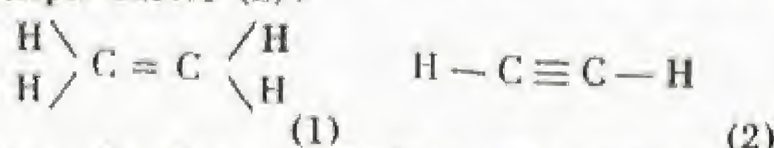
Así, es posible atribuir una fórmula de constitución al hidrocarburo C_2H_6, que existe realmente.

En cambio, nunca se han podido preparar hipotéticos hidrocarburos del tipo C_2H_5, C_2H_8, etc., cuya representación esquemática no se ajusta a las reglas antes enunciadas.

Enlaces múltiples. — Los átomos polivalentes (oxígeno, nitrógeno) pueden intercambiar varias valencias con otro átomo polivalente. Estos tipos de enlaces se denominan **múltiples** por oposición a los enlaces simples, tales como los expresados en las fórmulas anteriores.

El formol, CH_2O $\genfrac{}{}{0pt}{}{H\diagdown}{H\diagup} C = O$, ofrece un ejemplo de *doble enlace* entre el carbono y el oxígeno. El ácido cianhídrico, $H - C \equiv N$, presenta en su fórmula un *triple enlace* carbono-nitrógeno. Además, el ácido cianhídrico presenta otra fórmula tautómera, $H - N = C$, en la que, caso excepcional, el carbono es divalente.

La experiencia muestra la existencia de *enlaces múltiples entre átomos de carbono.* Los compuestos C_2H_4 (etileno) y C_2H_2 (acetileno) poseen, en la fórmula desarróllada, el primero un doble enlace (1), el segundo un triple enlace (2):



Radicales. — *Se llama* **radical** (o **resto**) *un fragmento de la molécula orgánica que no existe en libertad, pero que, en el transcurso de ciertas reacciones, interviene globalmente.*

La noción de radical es de gran utilidad para establecer las fórmulas desarrolladas y para la previsión de las reacciones, como se pone de manifiesto en el ejemplo siguiente.

Consideremos el caso del *alcohol ordinario* (alcohol etílico) cuya fórmula bruta es C_2H_6O. Es fácil comprobar que reacciona con el ácido clorhídrico de acuerdo con la ecuación



$$C_2H_6O + HCl \rightarrow C_2H_5Cl + H_2O.$$

Se observa así que la reacción ocurre como si la molécula de alcohol se hubiera escindido en dos porciones, C_2H_5 y OH, de las cuales la primera se une al átomo de cloro del ácido clorhídrico para formar el derivado clorado (cloruro de etilo), y la segunda al hidrógeno del mismo ácido para formar agua.

Para hacer resaltar este hecho, se puede considerar la posibilidad de que la molécula de alcohol resulte de la unión de dos radicales, y atribuirle entonces la fórmula C_2H_5OH.

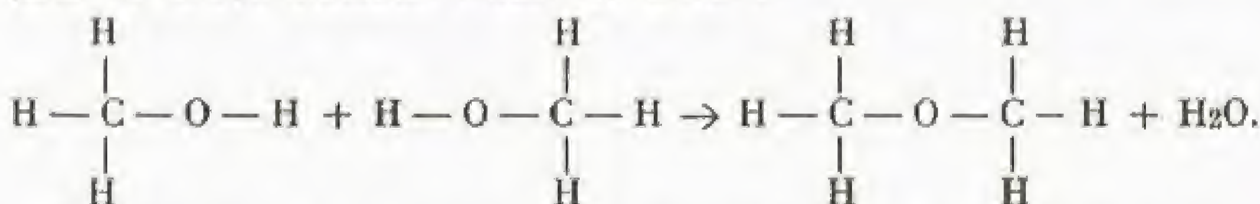
Ahora bien, hemos visto antes que a la fórmula bruta C_2H_6O corresponden dos esquemas desarrollados. El esquema nº 1 pone en evidencia precisamente los radicales C_2H_5 y OH, y es por lo tanto el que conviene adoptar para representar la molécula de alcohol.

Se puede comprobar la validez de esta elección de la manera siguiente. El segundo compuesto correspondiente a la misma fórmula bruta, C_2H_6O, es conocido. Se obtiene deshidratando el espíritu de madera (alcohol metílico):



$$2CH_4O \rightarrow C_2H_6O + H_2O.$$

Si se escriben las fórmulas desarrolladas de dos moléculas de alcohol metílico una al lado de otra, se deduce que el esquema (2) se impone para el cuerpo formado (óxido de metilo).



En cada uno de estos cuerpos se puede observar la presencia del radical CH_3.

Este ejemplo sencillo da una idea de los caminos que se pueden seguir para determinar la elección de la fórmula desarrollada de un compuesto. Naturalmente, el problema es mucho más arduo cuando la molécula se complica. En ciertos casos, han sido precisos laboriosos trabajos, que han durado varias décadas, antes de lograr determinar la constitución de un solo cuerpo.

Fórmulas semidesarrolladas. — Generalmente, en la práctica es inútil desarrollar completamente las fórmulas de constitución; en efecto, en la mayor parte de los casos basta con poner en evidencia ciertos radicales. Así, el alcohol etílico se representará casi siempre por medio de los esquemas semidesarrollados:



$$CH_3 - CH_2OH \quad \text{o} \quad C_2H_5 - OH,$$

según se considere necesario o no destacar el átomo de carbono que va unido al radical OH —.

A partir de estas representaciones, es fácil reproducir las fórmulas completamente desarrolladas.

Valencia de los radicales. — Al igual que los átomos, los radicales pueden ser monovalentes o polivalentes. Los radicales de que nos hemos ocupado hasta ahora son todos ellos monovalentes. Se les representa por los esquemas C_2H_5 —, CH_3 —, OH —, es decir, indicando la valencia.

De la fórmula del formol, CH_2O, se deduce que el radical $CH_2 =$ es divalente, etc.

Cada radical se designa por un nombre particular: así, OH —, *oxhidrilo* (o hidroxilo); CH_3 —, *metilo*; CH_2 =, *metileno*, etc.

Naturaleza de las valencias en los compuestos orgánicos. — Como norma general, las combinaciones orgánicas no son capaces de disociarse en iones. El carácter de los enlaces entre átomos, ya mencionados en el capítulo de la **clasificación periódica de los elementos**, se designa con el nombre de *covalencia* (v. QUÍMICA GENERAL, página 250).

Cadenas carbonadas — Series homólogas — Funciones

Hidrocarburos alifáticos. — Los **hidrocarburos** alifáticos son combinaciones binarias de carbono e hidrógeno. Estos cuerpos son los más simples de la química orgánica.

Los hidrocarburos se denominan **saturados** cuando la molécula no puede contener un número mayor de átomos de hidrógeno. Los hidrocarburos de este tipo *no pueden dar lugar a reacciones de adición.*

Series homólogas. — El término de serie tiene un sentido muy vago en química orgánica. Sin embargo, existen ciertos cuerpos que presentan analogías en su fórmula, lo que permite agruparlos en las llamadas **series homólogas.**

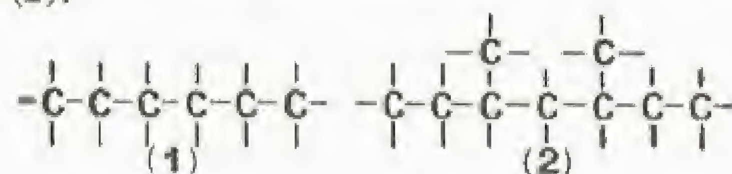
Así, el metano, el etano y el propano forman parte de una misma serie homóloga.

En las series homólogas, el paso de un término al inmediatamente superior supone un incremento equivalente a CH_2.

Por ejemplo, el etano ($CH_3 - CH_3$) es el homólogo *superior* del metano ($H - CH_3$) y al mismo tiempo el homólogo *inferior* del propano ($CH_3 - CH_2 - CH_3$).

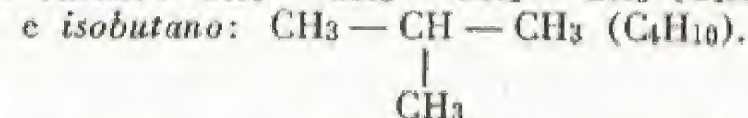
En cada serie homóloga, el punto de ebullición aumenta generalmente de manera más o menos regular al pasar de un término a otro superior.

Hidrocarburos de cadena ramificada. — Cuando un átomo de carbono se liga directamente a más de dos átomos de carbono, se producen las llamadas **cadenas ramificadas,** tales como la representada en la fórmula (2).



Cadena normal (lineal) Cadena ramificada

Los hidrocarburos con cadena ramificada son isómeros de los hidrocarburos normales que cuentan con el mismo número de átomos de carbono.

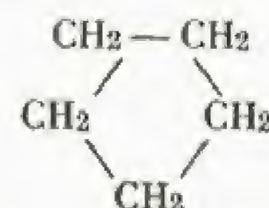




Ejemplo: *butano*: $CH_3 - CH_2 - CH_2 - CH_3$ (C_4H_{10})
e *isobutano*: $CH_3 - CH(CH_3) - CH_3$ (C_4H_{10}).

El número de isómeros aumenta rápidamente en función del número de átomos de carbono.

Hidrocarburos saturados de cadena cerrada. — En las **cadenas cerradas** (o ciclos), los enlaces entre átomos de carbono forman un polígono cerrado.



En este caso, el calificativo de *saturado* exige una explicación: en efecto, estos cuerpos reaccionan con el hidrógeno por adición, pero se produce entonces una *ruptura de la cadena,* y por lo tanto no hay adición propiamente dicha.

Idea de la substitución. — Comparemos las fórmulas del metano y el alcohol metílico:



$$CH_4 \qquad CH_3OH.$$

Se puede considerar que la segunda se deriva de la primera mediante **substitución** de un átomo de hidrógeno por un radical monovalente OH —.

Se llega a la misma conclusión cuando se comparan el alcohol etílico y el etano



$$CH_3 - CH_3 \qquad CH_3 - CH_2OH.$$

Parece, pues, que se pueda hacer derivar la constitución de un alcohol de la del hidrocarburo saturado que tiene el mismo número de átomos de carbono en su molécula.

Las combinaciones ternarias (carbono, hidrógeno, oxígeno): alcohol metílico y alcohol etílico, contienen ambas un hidroxilo OH —. Puesto que este radical es común a numerosas moléculas y les confiere precisamente ciertas propiedades comunes, se dice que define una **función** (en este caso la función alcohol).

La noción de función ligada a la existencia de un radical determinado simplifica el estudio de las combinaciones orgánicas.

Por consiguiente, se deberá considerar en todo compuesto orgánico, por una parte, la función, y por otra, la cadena carbonada, cuyo estudio se confunde con el del hidrocarburo correspondiente.

Actualmente, se conoce un número relativamente grande de funciones, que más adelante resumimos.

Átomo de carbono y grupos funcionales. — El *átomo de carbono funcional* es el que lleva el radical (a veces otro átomo) que define la función.

Se llama *grupo funcional* el conjunto formado por el átomo de carbono funcional, el radical funcional y los átomos de hidrógeno enlazados directamente al carbono.

Así, el grupo funcional en el alcohol propílico es — CH_2OH, y en el alcohol isopropílico, $\rangle$CHOH.

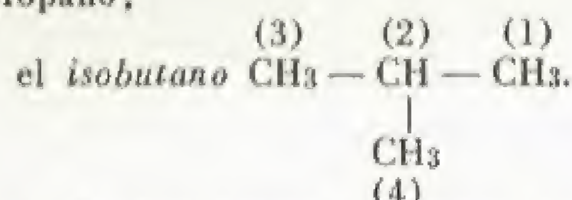
El primero es monovalente y consta de *un solo radical carbonado* (C_2H_5 —); se denomina **primario.** El segundo, divalente, está integrado por *dos radicales* carbonados (CH_3 —), por lo que se dice que es **secundario.**

Se puede imaginar, y existe, en efecto, un grupo funcional alcohol **terciario,** $\rangle$C — OH [p. ej.: alcohol butílico terciario $(CH_3)_3 \equiv$ $\equiv$ C — OH]. Por extensión, se dice que el hidrocarburo $(CH_3)_4C$ posee un átomo de carbono **cuaternario.**

Aplicación de estas nociones: butanos y alcoholes butílicos. — Para resumir con un ejemplo práctico las principales nociones expuestas en el presente capítulo, vamos a tratar de determinar la constitución de los hidrocarburos y de los alcoholes con cuatro átomos de carbono.

Un hidrocarburo con cuatro carbonos *(butano)* difiere del propano por un grupo CH_2. Su fórmula se deducirá de la del propano, sin más que substituir un átomo de hidrógeno por un radical metilo (CH_3).

A partir del propano, $CH_3 - CH_2 - CH_3$, se obtendrán *dos* isómeros,
(3) (2) (1)
según la substitución se efectúe en (1) o en (2):
el *butano normal*, $CH_3 - CH_2 - CH_2 - CH_3$, homólogo superior del
(4) (3) (2) (1)
propano;


el *isobutano* $CH_3 - CH(CH_3) - CH_3$ [(3) (2) (1), CH_3 (4)].

Al butano normal corresponden dos alcoholes $C_4H_{10}O$:
el *alcohol butílico normal*, $CH_3 - CH_2 - CH_2 - CH_2OH$ [el hidroxilo va ligado a uno de los carbonos equivalentes (1) o (4)], alcohol primario, homólogo del alcohol propílico;
el *alcohol butílico secundario*, $CH_3 - CH_2 - CHOH - CH_3$, en el que la substitución tiene lugar en (2) o (3). [Este cuerpo presenta el fenómeno de isomería óptica. V. p. 317.]
A partir del isobutano, se pueden derivar otros *dos* alcoholes por substitución, ya en (1) (3) o (4), carbonos equivalentes, ya al contrario en (2); los cuerpos así obtenidos son:
el *alcohol isobutílico* primario, $(CH_3)_2CH - CH_2OH$;
el *alcohol butílico terciario*, $(CH_3)_3C - OH$.
Si se repite este ejercicio con los cuerpos que contienen 5 carbonos, se observa que existen tres hidrocarburos 6_5H_{12} (pentanos) y ocho alcoholes $C_{15}H_{12}O$, de los que tres presentan el fenómeno de isomería óptica.

Principales funciones orgánicas

Funciones monovalentes. — Vamos a estudiar ahora las principales funciones que se obtienen reemplazando *un solo* átomo de hidrógeno por un radical funcional monovalente.
Los radicales que pueden ser fijados son:
a) El *hidroxilo* $- OH$, que se deriva del *agua*, $H - OH$, y que conduce a la función **alcohol;**
b) Un *halógeno* ($- F$, $- Cl$, $- Br$, $- I$), derivado de *hidrácido* (HF, HCl, HBr, HI), que crea la función **derivado halogenado** o, hablando con más propiedad, **monohalogenado** (derivado fluorado, clorado, bromado, yodado);
c) El *amino* $- NH_2$, originado por el *amoniaco*, $H - NH_2$, a expensas del cual se forma la función **amina;**
d) El *sulfhidrilo* $- SH$, que procede del ácido sulfhídrico, a partir del cual se obtiene la función **mercaptano.**
En cada una de estas funciones, los primeros términos son los compuestos


$$CH_3 - OH \quad CH_3 - Cl \quad CH_3 - NH_2 \quad CH_3 - SH.$$

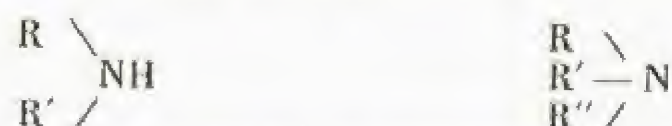
Para obtener los diversos términos de cada serie, basta con reemplazar en estos cuerpos uno, dos o los tres átomos de hidrógeno del radical CH_3 por otros radicales carbonados.
Por lo tanto, los grupos funcionales de cada uno de los compuestos obtenidos pueden ser *primarios*, *secundarios* o *terciarios*.
La deshidratación de los compuestos de este tipo conduce a la formación del doble enlace:


$$CH_3 - CH_2OH \rightarrow CH_2 = CH_2 + H_2O.$$

Se puede considerar que el alcohol, el derivado clorado, la amina y el mercaptano son, respectivamente, los derivados monosubstituidos del agua, del ácido clorhídrico, el amoniaco y el sulfuro de hidrógeno. Sus fórmulas generales pueden representarse por los esquemas


$$R - OH, \quad R - Cl, \quad R - NH_2, \quad R - SH,$$

en los que R designa un radical carbonado monovalente.
Son dignos de mención los derivados *disubstituidos* del *agua*, denominados **éteres** $R - O - R$, los del ácido sulfhídrico, llamados **tioéteres** $R - S - R$, así como los derivados di y trisubstituidos del amoniaco


$R, R' \searrow NH$ $\qquad$ $R, R', R'' \searrow N$

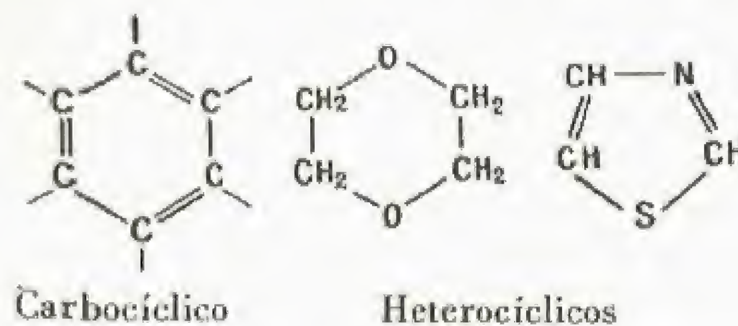
que, al igual que los derivados monosubstituidos, llevan el nombre de aminas.
Estas aminas se titulan *primarias*, *secundarias* o *terciarias*, según que el átomo de nitrógeno vaya ligado a uno, dos o tres radicales carbonados.

Funciones divalentes. — Si se reemplazan dos hidrógenos por dos átomos monovalentes (cloro, bromo, yodo), se obtienen los derivados dihalogenados (p. ej.: CH_2Br_2).
Ahora bien, estos dos átomos de hidrógeno pueden ser substituidos por un solo átomo divalente de oxígeno. La función obtenida así se denomina aldehído si el carbono funcional es primario: $R - C(=O) - H$,
y cetona si es secundario: $R - C(=O) - R$.

Funciones trivalentes. — La más importante de las funciones de este grupo es la función ácido, cuyo grupo funcional $- C(=O) - OH$ es forzosamente primario.
Del ácido se derivan el **cloruro** de ácido $R - CO - Cl$, el **anhídrido** $R - CO - O - CO - R$, la **amida** $R - CO - NH_2$ y el **nitrilo** $R - C \equiv N$.
OBSERVACIÓN. Los derivados tetrasubstituidos del metano no conducen a la creación de *funciones*. Se trata en este caso de cuerpos particulares derivados del anhídrido carbónico CO_2, tales como el *fosgeno* $COCl_2$, la *urea* $CO(NH_2)_2$, etc.

Cuerpos de funciones múltiples. — Una misma cadena carbonada puede contener varias funciones.
La *glicerina*, $CH_2OH - CHOH - CH_2OH$, es un trialcohol (o alcohol trivalente, es decir, cuerpo que posee tres funciones alcohol); el *ácido láctico*, $CH_3 - CHOH - COOH$, es un ácido-alcohol; el *ácido oxálico*, $COOH - COOH$, es un diácido, etc.

Compuestos cíclicos. — Los ciclos constituidos únicamente por enlace de átomos de carbono se denominan carbocíclicos, y aquellos en los que el enlace se efectúa mediante otros átomos diferentes (oxígeno, azufre, nitrógeno, etc.), además del carbono, se llaman heterocíclicos.



Carbocíclico Heterocíclicos

Los compuestos cíclicos pueden constar de cadenas laterales abiertas. Existen también ciclos complejos formados por la unión de varias cadenas cerradas.

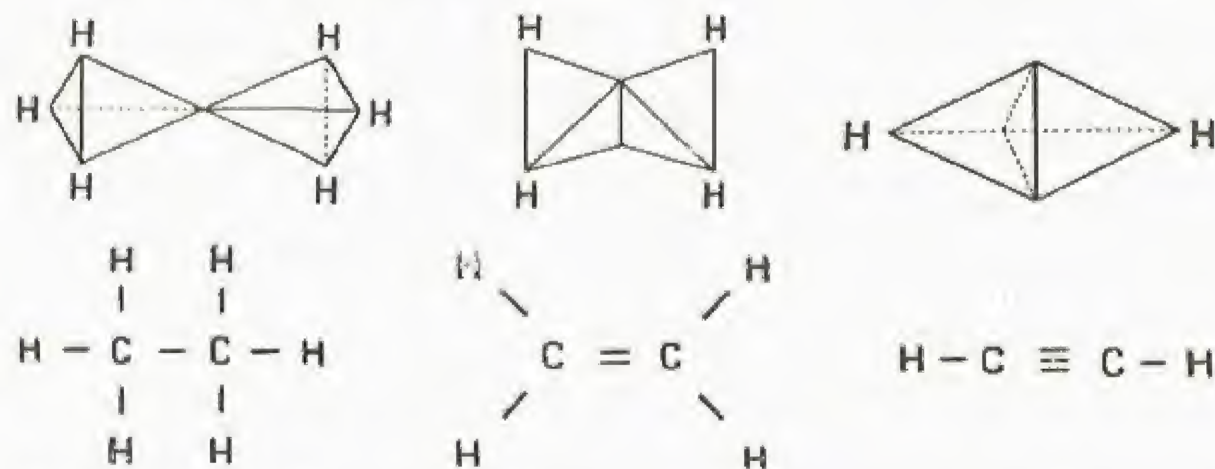
Isomería - Tautomería - Polimería

Tipos diversos de isomería. — Ya hemos visto que dos cuerpos diferentes que presentan la misma fórmula bruta se llaman isómeros.
Se distinguen:
a) La *isomería de compensación*, la mayor parte de las veces fortuita, entre cuerpos de *funciones diferentes*. Tal es el caso del alcohol etílico, C_2H_5OH, y del óxido de metilo, $CH_3 - O - CH_3$;
b) La *isomería de posición*, que engloba los cuerpos que tienen la misma función y que difieren solamente por la cadena carbonada (los alcoholes butílicos son isómeros de posición). Para los isómeros de este tipo, existe una regla general relativa a los puntos de ebullición: *la temperatura de ebullición de los isómeros de posición es tanto más baja cuanto más ramificada es la cadena;*
c) La *isomería geométrica;*
d) La *isomería óptica.*
Las fórmulas estereoquímicas facilitan la comprensión de estos dos últimos tipos de isomería.

Fórmulas en el espacio o estereoquímicas. — Cuando nos hemos servido de las fórmulas desarrolladas, nos hemos limitado a representar la manera en que los átomos se ligan, sin formular hipótesis alguna sobre *la disposición real de dichos átomos en el espacio.* El estudio de ciertos fenómenos (isomería óptica, v. p. 317) condujo a los sabios Le Bel y Van't Hoff a considerar que las cuatro valencias del átomo de carbono no están en el mismo plano, sino que, por el contrario, se hallan orientadas como las rectas que, partiendo del centro de gravedad de un tetraedro regular, se dirigen hacia los cuatro vértices. Estas cuatro direcciones forman entre sí ángulos de igual valor, lo que determina la equivalencia de los cuatro enlaces del carbono.
En estas condiciones, el metano, CH_4, tendrá la configuración espacial indicada a continuación (1), en la cual los trazos continuos representan las valencias, y los punteados las aristas del tetraedro regular.
Para simplificar el dibujo, se reemplaza este esquema por el representado en (2), en el que no figuran ni el átomo de carbono, al que se atribuye la posición correspondiente al centro de gravedad del tetraedro, ni los trazos de valencia. En cambio, se trazan las aristas del tetraedro, indicando en cada vértice los átomos (o radicales) que están enlazados con el carbono.

H H
H C H H H
H (1) H (2)

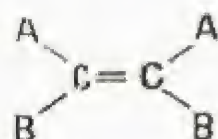
Estos esquemas se denominan *fórmulas en el espacio* o *fórmulas estereoquímicas*, por oposición a las fórmulas planas, de las que nos hemos ocupado hasta ahora. A continuación damos las fórmulas estereoquímicas del etano, C_2H_6, del etileno, C_2H_4, y del acetileno, C_2H_2, lo que da cuenta de la representación empleada para formular los enlaces simples, dobles y triples, respectivamente.



Las fórmulas planas tienen la ventaja de ser más manejables y son adoptadas como norma general, pues, en la mayoría de los casos, bastan para definir las propiedades de los cuerpos.

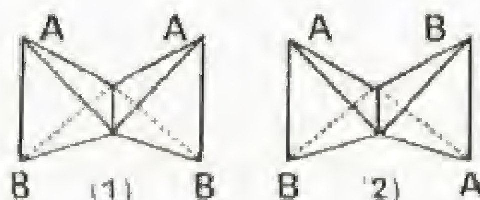
Isomería geométrica. — Este tipo de isomería se da en los cuerpos que tienen un doble enlace entre átomos de carbono.

Sea el compuesto:



en el que A y B son dos radicales monovalentes.

Su representación estereoquímica puede dar lugar a los dos esquemas siguientes (tetraedros ligados por una arista).



En el primero, los grupos idénticos se hallan en un mismo lado de la molécula; en el segundo, se encuentran a cada lado de la misma.

A la primera fórmula corresponde la isomería denominada **cis;** a la segunda, la isomería **trans.** Las fórmulas de los isómeros geométricos (o diestereómeros) no pueden coincidir por superposición; además, no se pueden asimilar a la representación de un objeto y de su imagen en un espejo.

Isomería óptica. — Un prisma de **nicol,** constituido por un cristal de espato de Islandia cortado según una dirección adecuada y pegado de nuevo con bálsamo del Canadá, deja pasar solamente la luz **polarizada,** que vibra en un plano único.

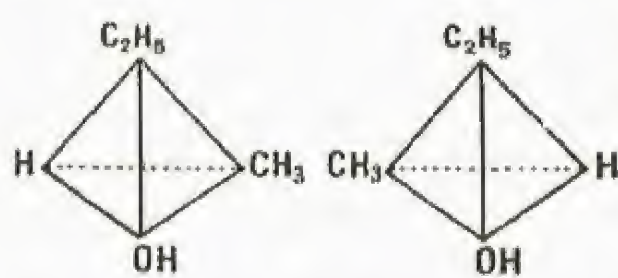
Un segundo prisma de nicol colocado detrás del primero *detiene* completamente los rayos luminosos si su sección principal es perpendicular a la del primero.

Las substancias *líquidas* o *disueltas* capaces de restablecer parcialmente el paso del rayo de la luz polarizada, cuando se hallan entre dos prismas de nicol en posición tal que la extinción debería ser total, se llaman **ópticamente activas** (se dice igualmente que están dotadas de **poder rotatorio).**

Este fenómeno es debido a que tales substancias provocan una rotación del plano de vibración de la luz polarizada, que gira de un ángulo α. Por consiguiente, es preciso hacer girar el segundo prisma de nicol del mismo ángulo para que la extinción sea completa de nuevo.

Las substancias que desvían el plano de luz polarizada hacia la derecha se denominan *dextrogiras*; las que lo hacen hacia la izquierda, *levogiras.*

La experiencia demuestra que la molécula de los cuerpos *ópticamente activos* contiene por lo menos un átomo de carbono cuyas cuatro valencias están saturadas por átomos o radicales *diferentes*; este carbono se denomina **asimétrico.**



El alcohol butílico secundario, $C_2H_5 - CH(OH) - CH_3$, cumple con esta condición; en efecto, el carbono mediano está ligado a los substituyentes $H-$, $OH-$, CH_3-, C_2H_5-.

Si se construye el tetraedro correspondiente a este carbono, se obtienen las dos representaciones arriba expuestas, que una es la imagen de la otra en el espejo, pero que no se pueden *superponer.*

Así se explica la existencia de dos alcoholes butílicos secundarios. Uno es dextrogiro; el otro, levogiro. El valor del ángulo de desviación del plano de luz polarizada es el mismo en ambos casos, pero el sentido es distinto.

Los isómeros de esta índole se llaman *antípodas* o *formas enantiomorfas.*

Propiedades de los antípodas. — Los antípodas tienen las mismas propiedades físicas y químicas. Se diferencian solamente por su efecto sobre la luz polarizada. Así, la forma dextrogira de la asparagina, compuesto orgánico nitrogenado extraído del espárrago, tiene sabor azucarado, mientras que la levogira es amarga.

Racémicos. — La mezcla equimolecular de dos formas enantiomorfas es ópticamente inactiva. En ciertos casos, se logra aislar una *combinación* de dos moléculas dextro y levogira, a la que se denomina racémico. Los racémicos se disocian en ciertas condiciones de temperatura.

Origen de los cuerpos activos. — Los cuerpos ópticamente activos son producidos generalmente por los seres vivos. La síntesis de una substancia activa a partir de compuestos inactivos conduce siempre a la formación de un cuerpo inactivo (en general a una mezcla de formas enantiomorfas).

Los antípodas se pueden separar principalmente por desdoblamiento químico o bioquímico.

Isomerización. — La isomerización de un compuesto consiste en la transformación química de éste en un *isómero.*

El isómero obtenido puede poseer la misma función que el compuesto original, y en tal caso se trata de un isómero de posición de éste, o tener una función distinta, diciéndose entonces que es un isómero de compensación.

Generalmente, la isomerización se produce por **migración** de átomos o de radicales en el seno de la molécula.

Tautomería. — La *tautomería* o *desmotropía* es un caso especial de isomería debido a la facultad que tienen ciertos cuerpos de presentarse en formas distintas, por modificación del enlace de determinados átomos. Por ejemplo, el hipotético alcohol vinílico $CH_2 = CHOH$ y el acetaldehído $CH_3 - CHO$, son las formas llamadas respectivamente enólica y carbonílica de un mismo tautómero.

Las mezclas de formas tautómeras en equilibrio se denominan *mezclas alelótropas.*

Polimería. — Se dice que un cuerpo es *polímero* de otro cuando su fórmula es un múltiplo de la de aquél; así, el trioximetileno, $C_3H_6O_3$, es un polímero del formaldehído CH_2O.

Plan de estudio de los cuerpos orgánicos

Vamos a proceder al estudio de los cuerpos orgánicos de acuerdo con la clasificación siguiente:

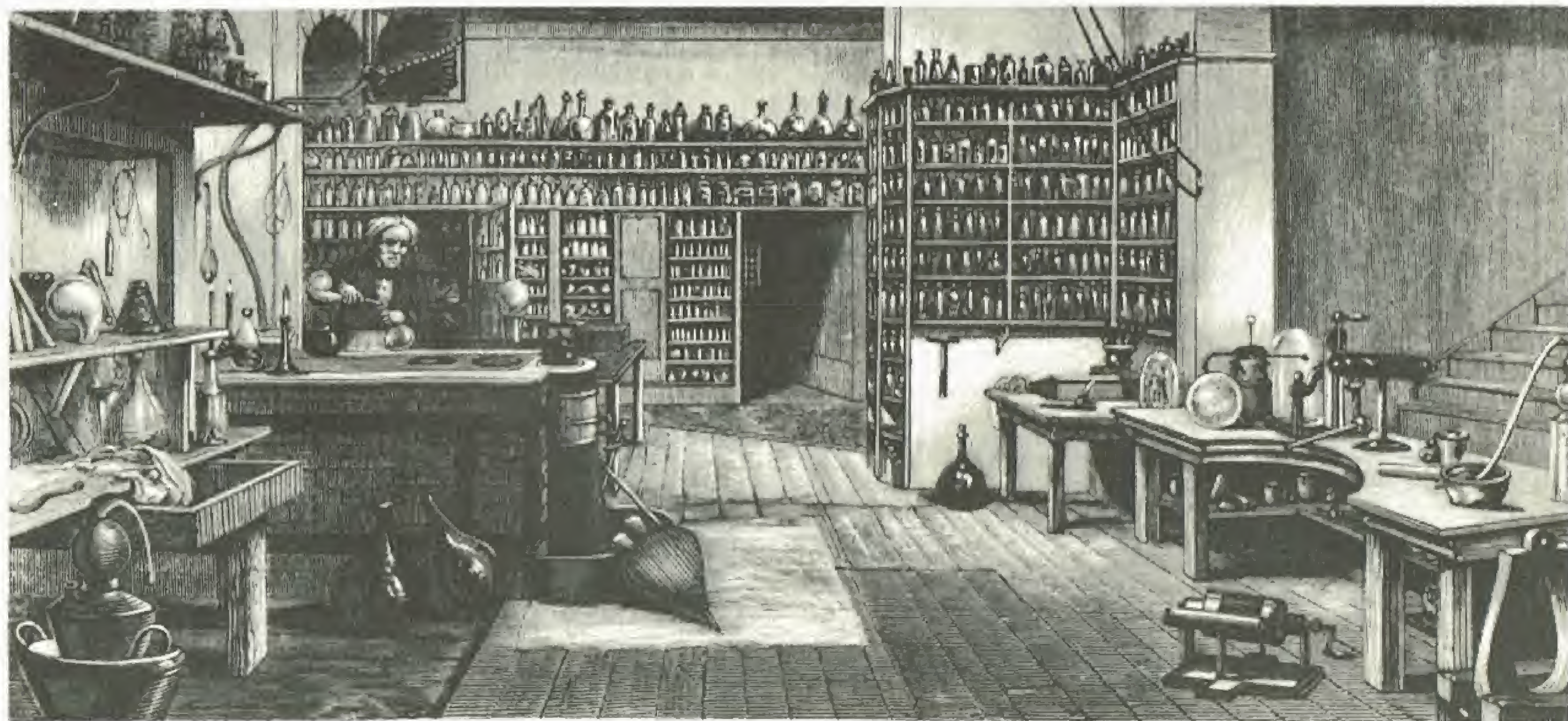
Serie alifática. — *Se llama compuestos alifáticos a todos los cuerpos orgánicos cuyas moléculas están constituidas exclusivamente por cadenas* **abiertas.**

El conjunto de estos cuerpos forma la **serie alifática,** llamada también **grasa.**

Serie cíclica. — *Todo cuerpo cuya molécula contiene por lo menos una cadena* **cerrada** *se denomina* **cíclico.** El conjunto de estos cuerpos recibe el nombre de **serie cíclica.**

En la serie alifática, nos ocuparemos en primer lugar de la cadena carbonada, cuyo estudio se confunde con el de los hidrocarburos saturados. Las propiedades generales de cada función se deducirán de las de los cuerpos de una sola función. A continuación, describiremos brevemente los principales compuestos de funciones múltiples.

Laboratorio de Faraday *(Fot. B. N.)*



Serie alifática

Generalidades sobre la nomenclatura: Nomenclatura vulgar. Nomenclaturas sistemáticas. Nomenclatura de Ginebra. — **Hidrocarburos saturados:** Generalidades. Propiedades físicas. Propiedades químicas. Combustión. Formación y métodos de obtención. Términos principales de la serie. — **Doble enlace e hidrocarburos etilénicos:** Generalidades. Isomería. Nomenclatura de los hidrocarburos etilénicos. Preparación. Propiedades físicas. Propiedades químicas generales. Reacciones de adición. Reacciones de oxidación. Reacciones de isomerización y de polimerización. Términos principales de la serie. — **Hidrocarburos acetilénicos:** Generalidades. Isomería. Nomenclatura. Propiedades físicas. Propiedades químicas generales. Propiedades de los hidrocarburos monosubstituidos. Preparación y síntesis de los hidrocarburos acetilénicos. Acetileno. — **Derivados monohalogenados:** Generalidades. Preparación. Propiedades físicas. Propiedades químicas. Términos principales. — **Derivados organometálicos:** Generalidades. *Derivados organomagnesianos mixtos*: Preparación. Modo de empleo de las sales de alcohilmagnesio. Reacciones que no modifican la cadena carbonada. Reacciones que modifican la cadena carbonada. Reacción con los derivados halogenados. Adición en el enlace carbono-oxígeno. Adición en los enlaces carbono-nitrógeno. *Derivados orgánicos mixtos del cinc. Derivados organometálicos simples.* — **Alcoholes:** Generalidades. Estado natural. Propiedades físicas. Propiedades químicas generales de la función alcohol. Influencia del grado de substitución de los alcoholes en las reacciones. Reacciones de oxidación de los alcoholes. Preparación de los alcoholes. Estudio de los términos principales. — **Éteres:** Generalidades. Preparación. Propiedades. Óxido de etilo. — **Mercaptanos y tioéteres:** Mercaptanos. Tioéteres. *Aminas:* Basicidad. Métodos generales de obtención de las aminas. Otros métodos de preparación. Nomenclatura. Propiedades. Principales términos. Bases de amonio cuaternarias. *Fosfinas. Arsinas.* — **Derivados dihalogenados aldehídicos y cetónicos.** — **Aldehídos y cetonas:** Generalidades. Isomería. Nomenclatura. Propiedades químicas generales. Enolización de los aldehídos y las cetonas. Reacciones de oxidación. Reacciones de adición. Reacciones de condensación con eliminación de agua. Preparación de los aldehídos y cetonas. Aldehídos. Propiedades físicas. Principales términos. Cetonas. Propiedades físicas. Principales términos. — **Derivados trihalogenados:** Cloroformo. — **Acidos y derivados:** Generalidades. Preparación. Propiedades físicas. Propiedades químicas. Principales términos. *Ésteres de los ácidos grasos saturados*: Generalidades. Preparación. Propiedades químicas. Principales términos. *Cloruros de ácido*: Nomenclatura. Preparación. Propiedades físicas. Propiedades químicas. *Anhidridos de ácido*: Generalidades. *Amidas*: Preparación. Propiedades físicas. Propiedades químicas. *Nitrilos*: Nomenclatura. Preparación. Propiedades físicas. Propiedades químicas. Principales términos. — **Grupo del anhídrido carbónico:** Ácidos y ésteres carbónicos. Derivados clorados. Derivados nitrogenados. Derivados sulfurados. — **Cuerpos con funciones múltiples:** Generalidades. *Polialcoholes*: Dialcoholes, dioles o glicoles. Glicerina o glicerol (propanotriol). Hidrólisis de las grasas. Polialcoholes diversos. *Azúcares. Hidratos de carbono*: Hexosas. Polisacáridos. *Ácidos-alcoholes*: Monoácidos-monoalcoholes. Poliácidos-polialcoholes. *Ácidos-cetonas*: Ácido y éster acetilacético. *Ácidos dicarboxílicos*: Ácido oxálico. Ácidos y ésteres cianacético y malónico. *Aminoalcoholes y aminoácidos.*

Generalidades sobre la nomenclatura

Nomenclatura vulgar. — Frecuentemente, los compuestos orgánicos conocidos desde hace tiempo reciben nombres particulares que recuerdan ya el origen del producto (*urea*, de orina; *acetona*, de ácido acético), ya de ciertas propiedades (*glicerina*, de glucos, dulce).

La terminología fundada sobre este principio constituye la nomenclatura vulgar, que, aunque tiene la ventaja de ser intuitiva y simple, es totalmente insuficiente hoy en día.

Nomenclaturas sistemáticas. — La necesidad de enumerar los compuestos orgánicos, cada vez más numerosos, ha conducido paulatinamente a establecer reglas para la formación de los nombres. Estas reglas se basan en las nociones de radicales y de substitución.

Así, los hidrocarburos



$$CH_3 - C \equiv CH \quad y \quad CH_3 - C \equiv C - C_2H_5,$$

que se derivan del acetileno por substitución simple o doble, se denominan respectivamente *metilacetileno* y *metiletilacetileno*.

Sin embargo, ante dificultades cada día mayores, los especialistas de química orgánica, reunidos en el Congreso de Ginebra (1892), decidieron aplicar una nomenclatura más racional y sistemática, la **nomenclatura de Ginebra.** Varios congresos ulteriores han introducido perfeccionamientos en las reglas adoptadas en Ginebra.

Observación. — Los nombres de los radicales, metilo, etilo, etc., pierden la *o* final cuando se les emplea como prefijos.

Nomenclatura de Ginebra. — El nombre de un cuerpo se deriva del correspondiente al hidrocarburo saturado; la desinencia *ano* se transforma en *eno* cuando se trata de hidrocarburos con doble enlace, y en *ino* en el caso de hidrocarburos con triple enlace. Las desinencias *ol*, *al*, *ona*, *oico*, etc., caracterizan respectivamente las funciones alcohol, aldehído, cetona, ácido, etc.

La posición de la función se define por el número de orden del carbono funcional.

Así, el alcohol butílico secundario



$$\underset{(4)}{CH_3} - \underset{(3)}{CH_2} - \underset{(2)}{CHOH} - \underset{(1)}{CH_3}$$

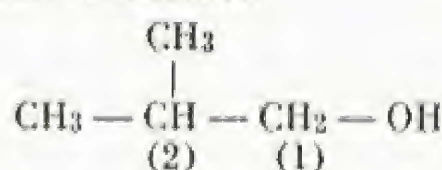
es el 2-*butanol*.

La acetona $CH_3 - CO - CH_3$ es la propanona, etc.

Estas reglas son válidas en lo que afecta a las *cadenas normales*.

Cuando se trata de cadenas *ramificadas*, se considera como normal la cadena más larga posible; las cadenas más cortas constituyen entonces los substituyentes.

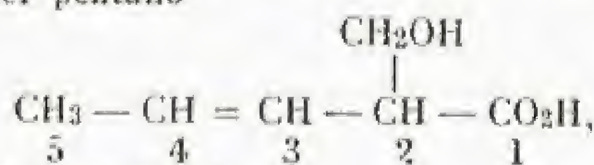
Por ejemplo, el alcohol isobutílico



$$CH_3 - \underset{(2)}{\overset{\overset{\displaystyle CH_3}{|}}{CH}} - \underset{(1)}{CH_2} - OH$$

se deriva del propano. Se le denomina 2-*metil*-1-*propanol*.

La nomenclatura de Ginebra permite establecer sin dificultad el nombre de los compuestos con **funciones múltiples.** Por ejemplo, el compuesto formulado a continuación, que posee una función alcohol en la cadena lateral, un doble enlace y una función ácido, y que, por otra parte, se deriva del pentano



$$\underset{5}{CH_3} - \underset{4}{CH} = \underset{3}{CH} - \underset{2}{\overset{\overset{\displaystyle CH_2OH}{|}}{CH}} - \underset{1}{CO_2H},$$

será el 2-*metil***ol**-3-*pent***eno**-1-**oico.**

Hidrocarburos saturados

Generalidades. — Los **hidrocarburos saturados** se conocen también con el nombre de hidrocarburos **metánicos, alcanos,** o **parafinas** (de *parum*, poco), debido a la poca afinidad química que manifiestan.

La fórmula general de estos hidrocarburos es C_nH_{2n+2}. Ya conocemos los nombres de los primeros términos de la serie, metano, CH_4, etano, C_2H_6, propano, C_3H_8, butanos, C_4H_{10}. A continuación vienen los pentanos, hexanos, heptanos, etc., cuyo nombre recuerda el número de átomos de carbono contenidos en la molécula.

Se hallan, en proporciones variables, en los petróleos de todos los orígenes, y son los constituyentes casi exclusivos de los petróleos de Pensilvania, que contienen una gama muy extensa de alcanos. El metano existe con profusión en la naturaleza.

Propiedades físicas. — Los cuatro primeros términos de la serie son gaseosos a la temperatura ambiente; desde el 5º hasta el 16avo son líquidos en las mismas condiciones, y los homólogos superiores, sólidos.

El número de isómeros aumenta rápidamente con el número de átomos de carbono de la cadena, y la separación de estos cuerpos resulta extremadamente ardua. El punto de ebullición de los diversos isómeros es tanto más bajo cuanto más ramificada es la molécula.

La densidad de los hidrocarburos es inferior a 1.

Son prácticamente insolubles en el agua, y solubles en los disolventes orgánicos anhidros.

Propiedades químicas. — Los hidrocarburos saturados manifiestan una actividad química extremadamente reducida. Son muy resistentes a la acción de los *oxidantes* (ácido crómico, permanganatos). El ácido sulfúrico concentrado no los disuelve, contrariamente a lo que sucede con los hidrocarburos no saturados. Son insensibles al bromo en frío. Cuando reaccionan, dan lugar únicamente a productos de *substitución*, en los que ciertos átomos o radicales reemplazan otros tantos átomos de hidrógeno.

Por lo dicho, se concibe fácilmente que en una molécula cualquiera, las cadenas abiertas que gozan de las propiedades de los hidrocarburos saturados representan un papel secundario en lo que atañe a las propiedades químicas del compuesto.

A pesar de todo, los hidrocarburos gaseosos reaccionan con el cloro, incluso con violencia si la combinación se produce con el concurso de la luz solar: generalmente, se forma así una mezcla de derivados clorados y se pone al mismo tiempo en libertad ácido clorhídrico.

Se puede esquematizar una de las reacciones posibles mediante la ecuación:



$$CH_3-CH_2-H + Cl-Cl \longrightarrow CH_3\,CH_2\,Cl + HCl$$

Combustión. — Los hidrocarburos saturados son utilizados sobre todo como combustibles. La combustión, con un *exceso* de aire, obedece a la ecuación siguiente:



$$2C_nH_{2n+2} + (3n + 1)O_2 \longrightarrow 2nCO_2 + 2(n + 1)\,H_2O.$$

En esta reacción se libera una cantidad de energía considerable, que se aprovecha bajo forma de calor en quemadores, o bajo forma de trabajo en los motores de explosión (carburantes).

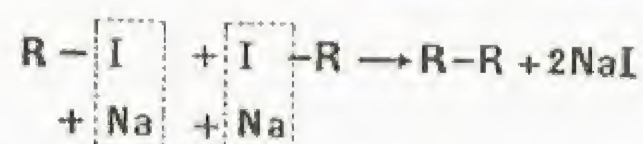
El método calorimétrico permite determinar el **poder calorífico** de los carburantes. Esta magnitud expresa la energía que se desprende en la combustión.

Como norma general, el poder calorífico es tanto mayor cuanto más elevada es la proporción de hidrógeno en la molécula considerada.

Formación y métodos de obtención. — a) *Métodos por reducción.* A igual número de átomos de carbono, los hidrocarburos saturados son los compuestos que contienen la mayor proporción de hidrógeno. Berthelot pudo demostrar que la reacción de diversos compuestos carbonados con el ácido yodhídrico a temperatura elevada provocaba la formación de los hidrocarburos saturados correspondientes. En efecto, el ácido yodhídrico actúa como agente hidrogenante.

Prácticamente, el hidrocarburo de fórmula general R — H se puede obtener por reducción del derivado yodado correspondiente R — I (v. p. 320).

b) *Métodos de síntesis.* Würtz ha logrado la síntesis de diversos hidrocarburos saturados, calentando el derivado yodado con sodio.



El sodio se une al yodo, dando yoduro sódico, y los dos radicales se agrupan y originan un hidrocarburo cuyo número de átomos de carbono es el doble del contenido en el derivado yodado primitivo.

c) *Degradación de los ácidos.* Un ácido orgánico, R — CO_2 — H, puede **degradarse** y perder una molécula de anhídrido carbónico, lo que da lugar a la formación del hidrocarburo R — H.

En la práctica, si se calienta la sal sódica con sosa, se elimina una molécula de carbonato sódico:



Este método sirve para preparar el metano, si se parte del acetato sódico.

Las sales de los ácidos orgánicos pueden descomponerse igualmente por **electrólisis.**

De manera especial, el acetato sódico se descompone, formando el anión CH_3 — CO_2^- y el catión Na^+.

El anión se descarga en el ánodo, pierde una molécula de anhídrido carbónico CO_2, y deja en libertad un radical CH_3 —, que se une con otro radical idéntico para formar el etano, CH_3 — CH_3.

Este método, que permite obtener el hidrocarburo R — R a partir del ácido R — CO_2 — H, se deriva a la vez de la degradación y de la síntesis.

Términos principales de la serie. — El **metano,** descubierto en 1778 por Volta, se origina principalmente en la turba y constituye el gas de los pantanos. Se forma también en la destilación de la hulla, y el gas de alumbrado contiene una proporción muy elevada de él.

Se desprende en las minas de carbón, y forma una mezcla explosiva con el aire (grisú). Se encuentra entre los gases naturales de las regiones volcánicas y petrolíferas.

Es muy poco soluble en el agua, y reacciona violentamente con el cloro a la luz del sol, dando derivados clorados por substitución.

Se puede obtener por síntesis, mediante varios métodos. Nos limitaremos a citar la hidrogenación del óxido de carbono en presencia de níquel finamente dividido



Los **petróleos** consisten esencialmente en mezclas de hidrocarburos naturales, que se separan por destilación en fracciones (éteres de petróleo, gasolinas, querosenos, aceites pesados, etc.) que hierven en intervalos de temperatura determinados, lo que permite utilizarlas con fines muy diversos y precisos (disolventes, carburación, calefacción, lubricación, etc.). Las fracciones cuyo punto de ebullición es elevado pueden engendrar otros cuerpos más volátiles por pirogenación. Esta operación, conocida con el nombre de **cracking,** permite aumentar el rendimiento de la gasolina extraída del petróleo.

(El lector leerá con provecho la exposición detallada que damos más adelante [v. p. 342 y siguientes] sobre este tema.)

Doble enlace e hidrocarburos etilénicos

Generalidades. — Los **dobles enlaces etilénicos** se presentan con frecuencia en los productos naturales. Se pueden crear artificialmente en las moléculas saturadas, utilizando los mismos procedimientos que conducen a la obtención de los hidrocarburos etilénicos.

Los **hidrocarburos etilénicos,** llamados también **olefinas** o **alcenos,** forman parte de los constituyentes de ciertos petróleos. Manifiestan una tendencia marcada a formarse en las reacciones pirogenadas, y se obtienen normalmente en *cracking* de los aceites pesados.

Isomería. Nomenclatura de los hidrocarburos etilénicos. — La fórmula general de los hidrocarburos etilénicos es C_nH_{2n}. La isomería depende a la vez de la forma de la *cadena* y de la posición del *doble enlace.* Por consiguiente, el número de hidrocarburos etilénicos es generalmente superior al de hidrocarburos saturados con el mismo número de carbonos, pero es inferior al de alcoholes en las mismas condiciones (así, a la cadena con tres átomos de carbono le pueden corresponder dos alcoholes y, en cambio, un solo hidrocarburo etilénico).

Los cuerpos con doble enlace *etilénico* pueden dar lugar al fenómeno de isomería geométrica.

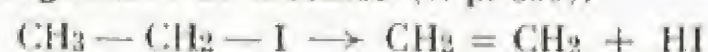
Los nombres de los diferentes hidrocarburos *etilénicos* recuerdan generalmente los de los alcoholes correspondientes: etileno, propileno, butilenos, amilenos, hexilenos, etc., transformados por la nomenclatura de Ginebra en etano, propano, butenos, pentenos, hexenos, etc. En efecto, la desinencia *eno* caracteriza los hidrocarburos con doble enlace.

Citaremos los nombres de unos cuantos **radicales no saturados** monovalentes. El radical CH_2 = CH — se denomina **vinilo;** el radical CH_2 = CH — CH_2 — es el **alilo** (de *allium,* ajo), isómero del **propenilo** CH_3 — CH = CH —. Los radicales alilo y propenilo se encuentran con profusión en los cuerpos naturales. El aroma del ajo es debido al sulfuro de alilo $(C_3H_5)_2S_2$.

Preparación. — a) *Creación del doble enlace.* La *deshidratación de los* **alcoholes** provoca la aparición del doble enlace (v. p. 323).



se obtiene el mismo resultado por eliminación de hidrácido en la molécula de los **halogenuros de alcohilo** (v. p. 600).



(el hidrácido puesto así en libertad se combina con un álcali);

b) *Procedimientos sintéticos.* Puesto que es fácil obtener los *derivados alílicos halogenados* (v. p. 330), se puede preconizar la síntesis de los hidrocarburos acetilénicos por reacción de un compuesto orgánico del magnesio R — Mg — I con el yoduro de alilo:



El proceso de esta síntesis es análogo al que conduce a la obtención de los hidrocarburos saturados.

Propiedades físicas. — Los tres primeros términos de la serie son gaseosos a la temperatura ordinaria; los siguientes son líquidos, y los superiores, sólidos. Hierven a temperaturas más bajas que los hidrocarburos correspondientes, y su densidad es menor que 1. Son prácticamente insolubles en el agua, y se mezclan, en cambio, con los disolventes orgánicos.

Propiedades químicas generales. — El doble enlace *etilénico* se caracteriza:

1° Por una tendencia a las **reacciones de adición,** que transforman la molécula *no saturada* en saturada;

2° Por una marcada **fragilidad** a la acción de los **oxidantes,** que provocan la escisión de la molécula en dos fragmentos, precisamente en la zona del doble enlace.

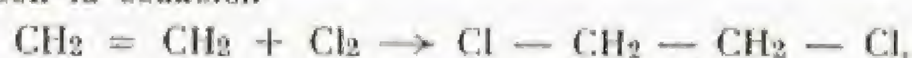
3° Por la facultad de formar **isómeros** y **polímeros.**

Reacciones de adición. — *a)* La **hidrogenación** de los hidrocarburos etilénicos conduce a los **hidrocarburos saturados;** la reacción se produce al fijarse dos átomos de hidrógeno en el doble enlace



lo que se puede lograr por vía química o catalítica (v. p. 331).

b) Los **halógenos** reaccionan por adición. El etileno capta cloro de acuerdo con la ecuación



El derivado diclorado (cloruro de etileno) así formado es un líquido más denso que el agua, cuyo aspecto recuerda el del aceite. Esta semejanza hace que se llame *olefinas* a los hidrocarburos homólogos del etileno.

El bromo reacciona rápidamente con los hidrocarburos etilénicos, decolorándose (reacción característica de los cuerpos no saturados). En general, la adición de yodo es más difícil.

c) Los hidrácidos se adicionan en la posición del doble enlace, y forman así los derivados **monohalogenados**



d) Los hidrocarburos etilénicos se transforman en **alcoholes** por **hidratación;** para esta reacción sirve el ácido sulfúrico, que disuelve el hidrocarburo (lo que permite diferenciar estos hidrocarburos de los saturados) y lo transforma en éter sulfúrico ácido



que, por hidrólisis ulterior mediante agua, da alcohol y ácido sulfúrico.

Reacciones de oxidación. — Los oxidantes enérgicos provocan la **ruptura** de la molécula en la zona del doble enlace, y fijan un átomo de oxígeno en cada uno de los átomos de carbono adyacentes. Cada fragmento así originado se transforma ya en **aldehído,** ya en **cetona,** según el carbono es primario o secundario.

Naturalmente, los aldehídos no resisten a la acción del medio reaccionante y se oxidan, dando **ácidos.**

Así, si se trata de hidrocarburo $CH_3 — CH = C \begin{smallmatrix} / CH_3 \\ \backslash CH_3 \end{smallmatrix}$, con permanganato potásico, se forman el *aldehído* $CH_3 — \overset{/\!/ O}{C} — H$ y la *cetona* $\begin{smallmatrix} CH_3 \backslash \\ CH_3 / \end{smallmatrix} C = O.$

A su vez, el aldehído se oxida y origina el *ácido* $CH_3 — \overset{/\!/ O}{C} — OH$.

El examen de los productos formados en las reacciones de oxidación permite determinar la constitución de los hidrocarburos etilénicos, sobre todo en lo que respecta a la posición del doble enlace.

Reacciones de isomerización y de polimerización. — Los hidrocarburos etilénicos se **isomerizan** si son calentados en presencia

de ciertos agentes; esta reacción se caracteriza por la **migración** del doble enlace. Generalmente, la molécula adquiere un aspecto más simétrico.

La **polimerización** de los hidrocarburos polietilénicos da productos mal definidos, algunos de los cuales han adquirido gran importancia industrial (v. PLÁSTICOS, p. 363).

Términos principales de la serie. — El *etileno* o *eteno*, $CH_2 = CH_2$, se forma en numerosas reacciones pirogenadas. El gas de alumbrado contiene de 4 a 5% de este hidrocarburo. Es un gas incoloro, de olor poco marcado, poco soluble en el agua. Arde con llama muy luminosa. Se puede extraer industrialmente de los productos procedentes del cracking de los aceites pesados.

Hidrocarburos acetilénicos

Generalidades. — Los hidrocarburos *acetilénicos* se derivan del acetileno $H - C \equiv C - H$, mediante substitución de los átomos de hidrógeno por radicales carbonados. La fórmula general de estos hidrocarburos es C_nH_{2n-2}.

Los hidrocarburos acetilénicos pueden ser **monosubstituidos,** $R - C \equiv C - H$, o **disubstituidos,** $R - C \equiv C - R$. No existen en la naturaleza, pero se forman en las reacciones pirogenadas.

Isomería. Nomenclatura. — La isomería de los hidrocarburos recuerda la de los hidrocarburos etilénicos; sin embargo, el número de isómeros es menor, pues el triple enlace requiere la presencia de dos átomos de carbono primarios adyacentes.

En la nomenclatura general, se les enuncia como si se tratase de acetilenos substituidos:

metilacetileno $CH_3 - C \equiv C - H$;

dimetilacetileno $CH_3 - C \equiv C - CH_3$.

(Estos cuerpos reciben corrientemente el nombre de *alileno* y *crotonileno.*) La nomenclatura de Ginebra, que caracteriza estos hidrocarburos por la desinencia **ino,** exige que se denomine a estos compuestos *propino* y *2-butino,* respectivamente.

Propiedades físicas. — Los hidrocarburos de esta serie son gaseosos a la temperatura ordinaria hasta el cuarto término, líquidos hasta el 14avo, y sólidos los superiores. Todos ellos son muy poco solubles en el agua, y solubles en los disolventes orgánicos, especialmente en la acetona. Su densidad en estado líquido es menor que 1.

Propiedades químicas generales. — Las propiedades de los hidrocarburos acetilénicos, debidas a la no saturación de la molécula (existencia de enlaces múltiples), recuerdan las de los hidrocarburos etilénicos. Así, al igual que éstos, dan lugar a productos de *adición,* de *escisión,* de *isomerización* y de *polimerización.*

a) *Reacciones de adición.* Los hidrocarburos acetilénicos fijan dos o cuatro átomos de **hidrógeno,** transformándose primeramente en hidrocarburos etilénicos, y después en hidrocarburos saturados. Generalmente, la reacción se prosigue hasta la saturación.

Los **halógenos** se unen de igual manera: dos o cuatro átomos.

Los **hidrácidos** conducen a la formación de los derivados *dihalogenaros cetónicos*



$$R - C \equiv C - H + 2HBr \rightarrow R - CBr_2 - CH_3,$$

en los que el halógeno se fija con preferencia en el carbono más substituido.

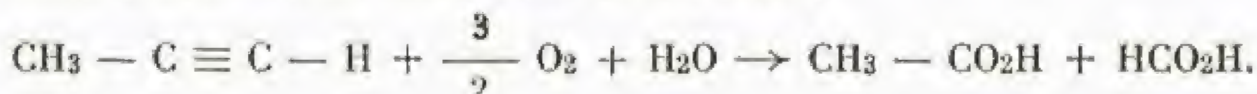
Los hidrocarburos acetilénicos se transforman por **hidratación** en **cetonas,** en las que se fija solamente una molécula de agua:



$$R - C \equiv C - H + H_2O \rightarrow R - CO - CH_3.$$

Excepcionalmente, en estas mismas condiciones el acetileno da lugar al aldehído ordinario.

b) *Escisión de la cadena.* Los oxidantes transforman los hidrocarburos acetilénicos en una mezcla de dos **ácidos**

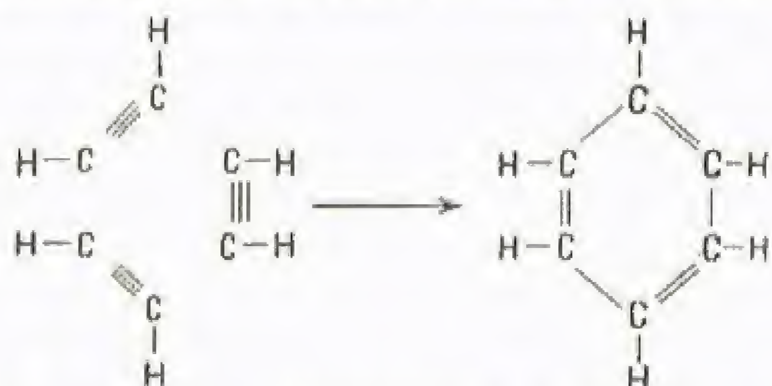


$$CH_3 - C \equiv C - H + \frac{3}{2} O_2 + H_2O \rightarrow CH_3 - CO_2H + HCO_2H.$$

Esta reacción permite determinar la posición del triple enlace.

c) *Isomerización y polimerización.* El triple enlace puede ser objeto de **migraciones** en el interior de la molécula, por efecto de diversos agentes.

La **polimerización** se efectúa por acción del calor o del ácido sulfúrico, y conduce a la obtención de hidrocarburos cíclicos. Así, tres moléculas de acetileno, C_2H_2, se ligan y forman una molécula de benzol.



Propiedades de los hidrocarburos monosubstituidos. — En los hidrocarburos acetilénicos **monosubstituidos,** del tipo $R - C \equiv C - H$, el átomo de hidrógeno ligado al carbono funcional manifiesta **propiedades ácidas** y puede ser reemplazado por un metal.

El *sodio metálico* da los *derivados del tipo* $R - C \equiv C - Na$, que, al reaccionar con los halogenuros de alcohilo, permiten realizar numerosas síntesis (v. más abajo). A partir del acetileno, se obtienen los derivados *monosódico,* $H - C \equiv C - Na$, y *disódico,* $Na - C \equiv C - Na$.

Los hidrocarburos monosubstituidos reaccionan con el *cloruro cuproso* y con el *nitrato de plata* en solución amoniacal, dando respectivamente un precipitado rojo o amarillento de *acetiluro cuproso* y un precipitado blanco de *acetiluro de plata.* Estas reacciones son características de dichos hidrocarburos.

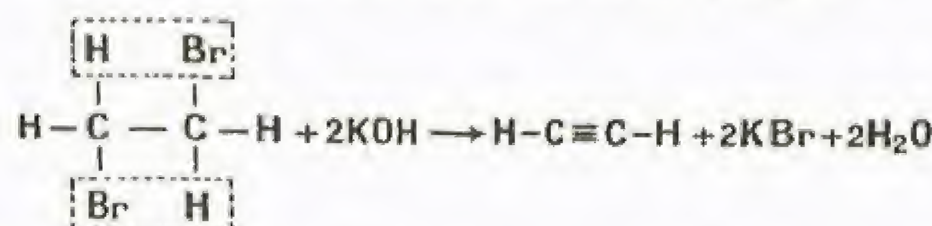
El carácter ácido del átomo de hidrógeno confiere a estas combinaciones la facultad de reaccionar con las sales de **alcohilmagnesio mixtas,** $R' - MgX$, lo que pone en libertad el hidrocarburo $R'H$:



$$R-C \equiv C-\boxed{H + R'}-MgX \rightarrow R-C \equiv C-MgX + R'H$$

Se obtienen de esta manera los derivados magnesianos de los hidrocarburos acetilénicos, que permiten introducir los triples enlaces en las moléculas.

Preparación y síntesis de los hidrocarburos acetilénicos. — *a) La eliminación de dos moléculas de hidrácido* ya en los derivados dihalogenados o aldehídicos tales como $CH_3 - CHBr_2$, ya en los derivados de adición de los hidrocarburos etilénicos tales como el bromuro de etileno $CH_2Br - CH_2Br$, da lugar a la obtención de los hidrocarburos acetilénicos; en efecto, la eliminación del hidrácido se efectúa mediante la potasa, que lo fija en forma de sal potásica.



$$H-\overset{\boxed{H \quad Br}}{\underset{\boxed{Br \quad H}}{C - C}}-H + 2KOH \rightarrow H-C \equiv C-H + 2KBr + 2H_2O$$

Estas reacciones son muy semejantes a las utilizadas para la preparación de los hidrocarburos etilénicos. Téngase en cuenta que si los hidrocarburos acetilénicos pueden dar *cetonas* por hidratación, en cambio estas *no pueden deshidratarse* y conducir a la formación de hidrocarburos.

b) Es posible realizar la **síntesis** de los hidrocarburos acetilénicos disubstituidos por acción de los halogenuros de alcohilo sobre los derivados sódicos o sobre los derivados orgánicos de los hidrocarburos acetilénicos monosubstituidos:



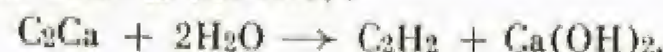
$$R-C \equiv C-\boxed{Na + I}-R' \rightarrow R-C \equiv C-R' + NaI$$



$$R-C \equiv C-\boxed{MgX + I}-R' \rightarrow R-C \equiv C-R' + MgXI$$

Acetileno. — El *acetileno* o *etino* se forma en las combustiones incompletas. Berthelot pudo ya realizar su síntesis, por combinación directa del carbono con el hidrógeno, haciendo saltar una chispa eléctrica en una atmósfera que contenía este gas.

El acetileno se prepara fácilmente descomponiendo el *carburo cálcico* con agua (el carburo C_2Ca se obtiene en el horno eléctrico por acción del carbón sobre la cal viva):



$$C_2Ca + 2H_2O \rightarrow C_2H_2 + Ca(OH)_2.$$

Es un gas incoloro, de olor agradable cuando es puro (el gas industrial es maloliente porque contiene vestigios de fosfuro y siliciuro de hidrógeno).

Es endotérmico, y puede estallar por compresión; sin embargo, se puede utilizar sin riesgo cuando es disuelto a presión en acetona. Arde con llama luminosa y gran desprendimiento de calor; esta última propiedad es utilizada en el soplete oxiacetilénico (soldadura autógena). Su empleo en el alumbrado ha perdido importancia. En cambio, ha adquirido gran desarrollo el procedimiento de hidratación del acetileno, que conduce a la formación del aldehído $CH_3 - CHO$, compuesto que sirve para la preparación industrial del ácido acético, por oxidación. Por otra parte, se polimeriza por efecto del calor, dando benzol.

Derivados monohalogenados

Generalidades. — Los derivados **monohalogenados** de los hidrocarburos saturados, llamados también **halogenuros de alcohilo,** comprenden los derivados **clorados** $R - Cl$, **bromados** $R - Br$, y **yodados** $R - I$, además de los **fluorados,** de escasa importancia.

En la nomenclatura general son considerados como ésteres y designados con el nombre de *cloruros, bromuros, yoduros y fluoruros de alcohilo.*

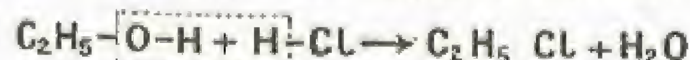
Así, CH_3I es el yoduro de metilo, $C_2H_5 - Cl$ el cloruro de etilo $\begin{matrix} CH_3 \diagdown \\ CH_3 \diagup \end{matrix} CHBr$ (o $CH_3 - CHBr - CH_3$) el bromuro de isopropilo, etc.

La nomenclatura de Ginebra llama a estos cuerpos yodometano, cloretano y 2-bromopropano.)

Los halogenuros de alcohilo son unos compuestos exclusivamente artificiales. *Ofrecen gran interés para las síntesis orgánicas,* pues permiten la introducción de radicales carbonados en las moléculas. Se dice que son agentes de **alcohilación.**

Preparación. — Los halogenuros de alcohilo se obtienen a partir de los **alcoholes:**

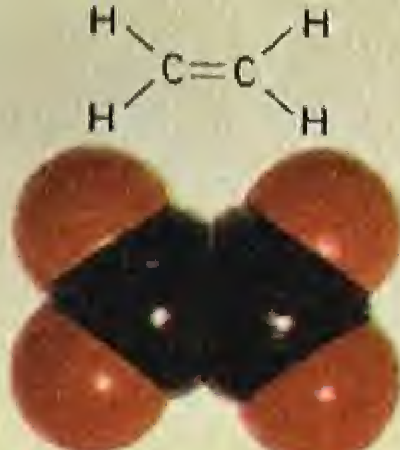
a) Por reacción con los hidrácidos, según la reacción de esterificación



$$C_2H_5-\boxed{O-H + H}-Cl \rightarrow C_2H_5Cl + H_2O$$



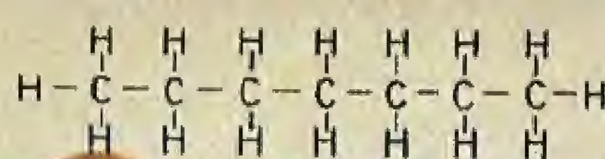
1. Etano



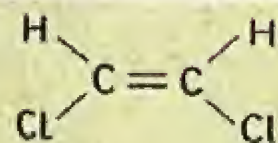
2. Etileno



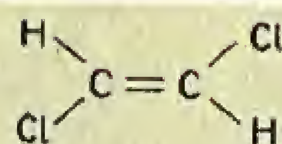
3. Acetileno



4. Heptano normal

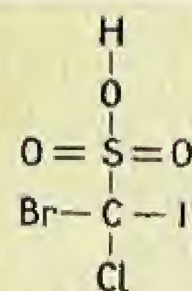


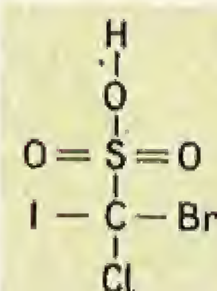
5. Cis-dicloroetileno



6. Trans-dicloroetileno

isomería geométrica





7 y 8. Ácido clorobromoyodometanosulfónico

isomería óptica

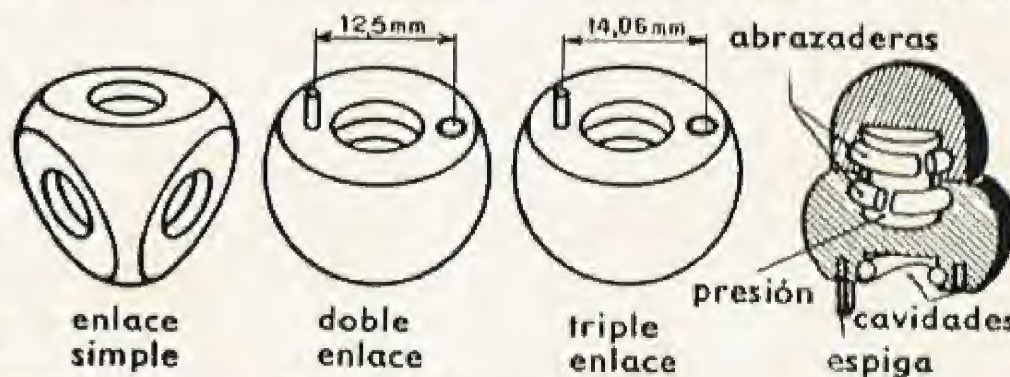
MODELOS ATÓMICOS DE FISHER-HIRSCHFELDER-TAYLOR

Los modelos atómicos utilizados hasta fecha reciente (v. *Fórmulas en el espacio*, p. 596) no daban cuenta del volumen ocupado por los diversos átomos o grupos de átomos en el seno de una molécula.

Los modelos de Fisher-Hirschfelder-Taylor permiten considerar las moléculas desde el punto de vista estereométrico (en efecto, representan las magnitudes reales de los rayos atómicos utilizando una escala de 100 000 000/1, es decir, 1 cm por un Å); la longitud de los enlaces queda así perfectamente definida, y además los ángulos de los enlaces son reales (todos estos datos han sido deducidos por medidas físicas, en particular por difracción de los electrones).

Para cada elemento existen diversos tipos de modelos, según el número y la naturaleza de los enlaces : cada elemento se representa por una o varias porciones de esferas delimitadas por una o varias caras planas. Con el fin de que la identificación sea rápida, todas las formas de un mismo elemento son del mismo color: negro para el carbono, anaranjado para el hidrógeno, azul claro para el oxígeno, azul oscuro para el nitrógeno, amarillo para el azufre, verde para el cloro, amarillento para el bromo y pardo para el yodo.

La ligadura de los diferentes átomos se efectúa gracias a las presiones mantenidas mediante muelles en las cavidades abiertas en el centro de cada cara plana. Un enlace simple se representa por un modelo que presenta una sola cavidad (en este caso, es posible la rotación libre alrededor del eje del enlace). En cuanto a los enlaces múltiples, que implican la rigidez del enlace, los modelos constan además de una espiga y de una cavidad cilíndrica profunda (destinada a alojar la espiga de otro átomo). La distancia entre las espigas es distinta para el doble y para el triple enlace, de manera que es imposible cometer error al montar el modelo.



El número de caras planas en un modelo es igual al número de enlaces que el átomo puede utilizar; el número de espigas indica el número de enlaces múltiples.

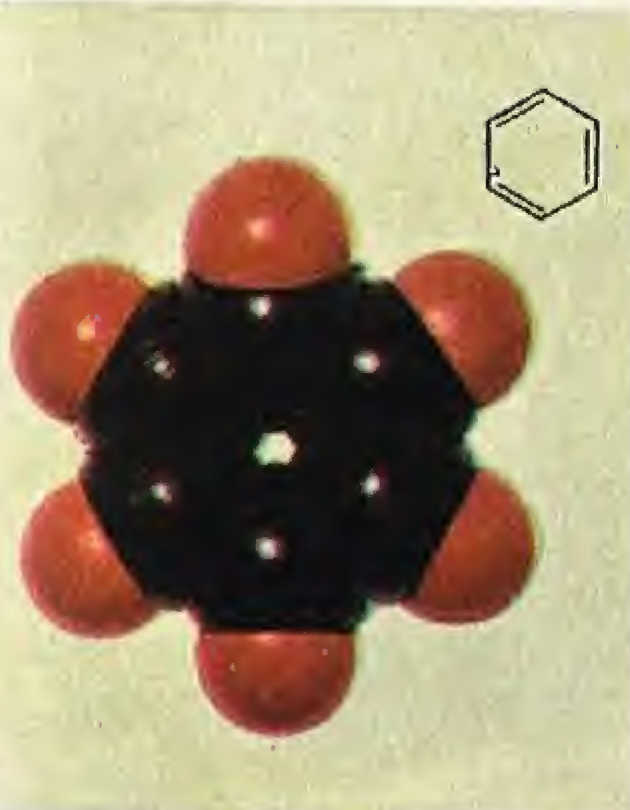
El modelo del hidrógeno presenta una cara plana; el del oxígeno, dos en el caso de los éteres, y una sola cuando se trata del grupo carbonilo; el nitrógeno de las aminas tiene tres caras planas; el carbono parafínico, cuatro, etc.

La tres primeras figuras representan respectivamente los casos de enlaces simple (etano), doble (etileno) y triple (acetileno) [compárese con los esquemas de la p. 597]. La figura 4 muestra una cadena con siete átomos de carbono (heptano normal).

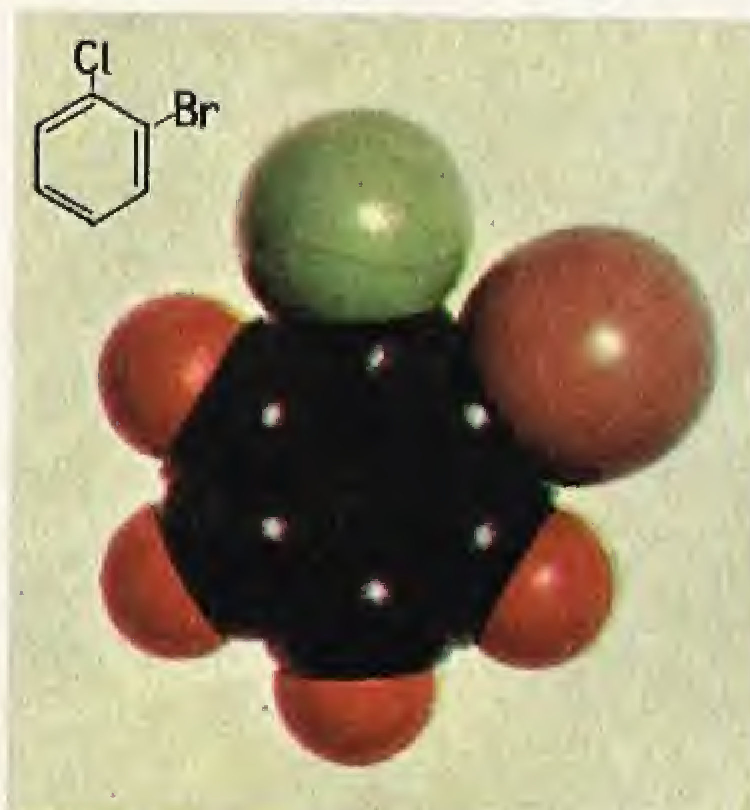
Los modelos de Fisher-Hirschfelder-Taylor dan cuenta de los diversos tipos de isomería. Las figuras 5 y 6 representan un caso de isomería geométrica (v. p. 597) : cis- y trans-dicloroetileno. Las figuras 7 y 8 ilustran la isomería óptica (v. p. 597) : caso de los dos inversos ópticos del ácido clorobromoyodometanosulfónico (un modelo es al otro como un objeto es a su imagen en un espejo).

Las figuras siguientes (9 a 12) representan el benzol (obsérvese que la representación simbólica de los núcleos bencénicos evoca la forma de la molécula) y los tres isómeros disubstituidos (v. p. 612) : orto-, meta-, para-clorobromobenceno.

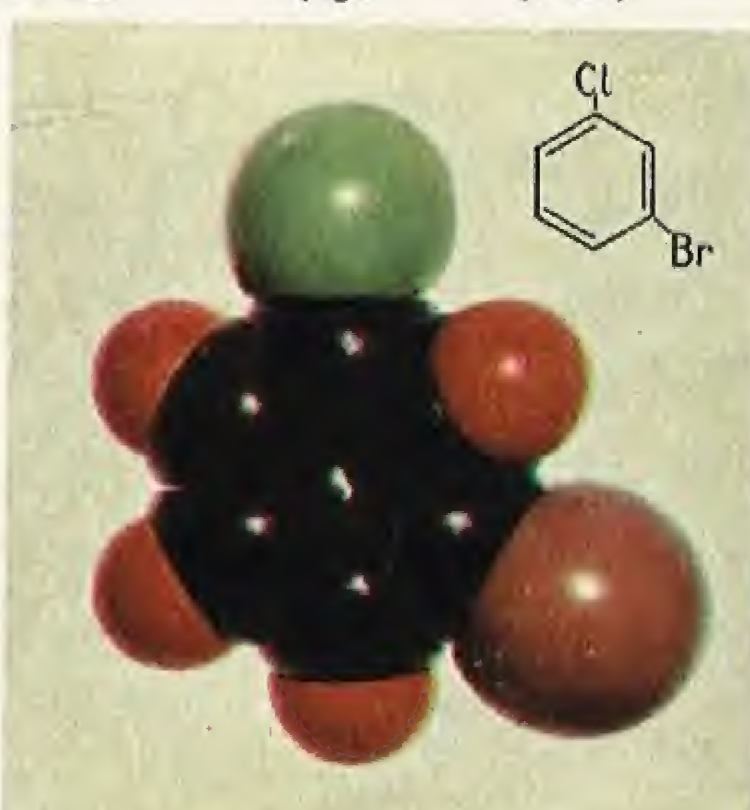
En la parte inferior de la página figuran unos cuerpos más complejos (relativamente simples aún) : el cloruro del ácido paratoluenosulfónico, el naftaleno y la para-aminofenilsulfonilamida (v. pp. 619 y 621).



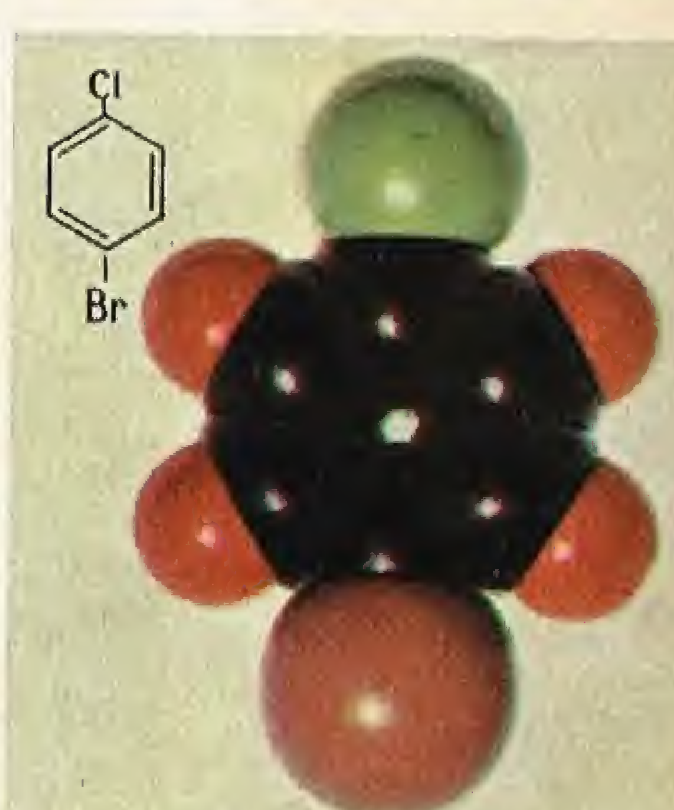
9. Benzol



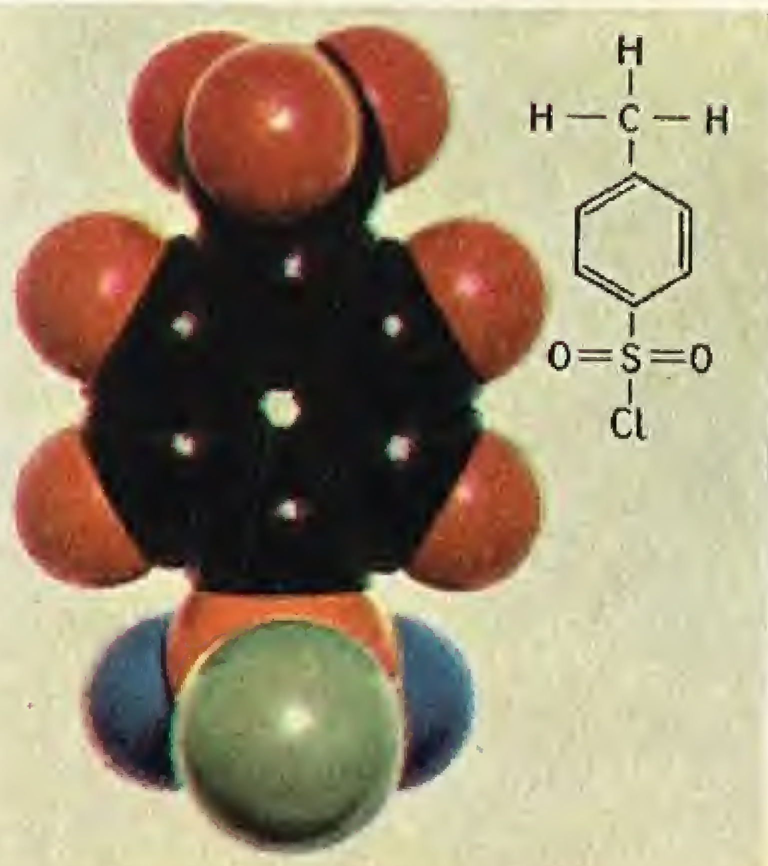
10. Orto-clorobromobenceno



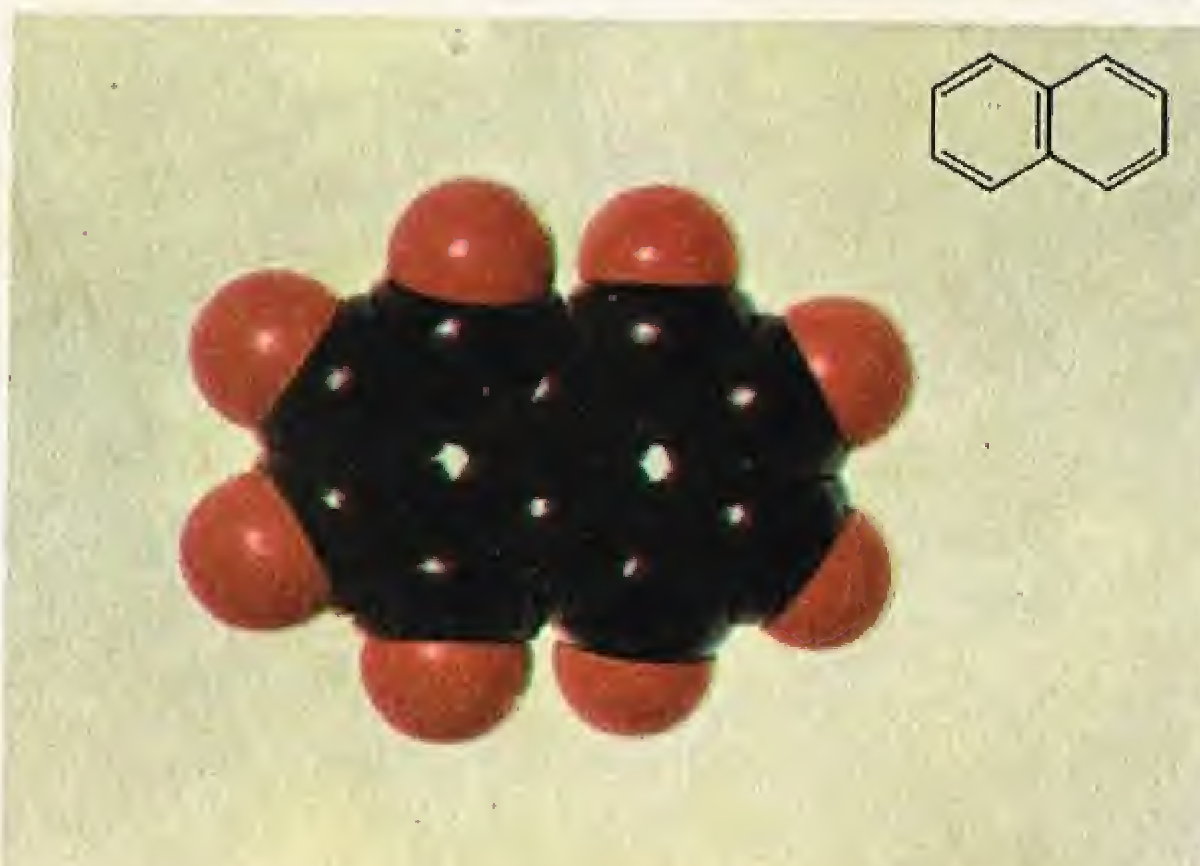
11. Meta-clorobromobenceno



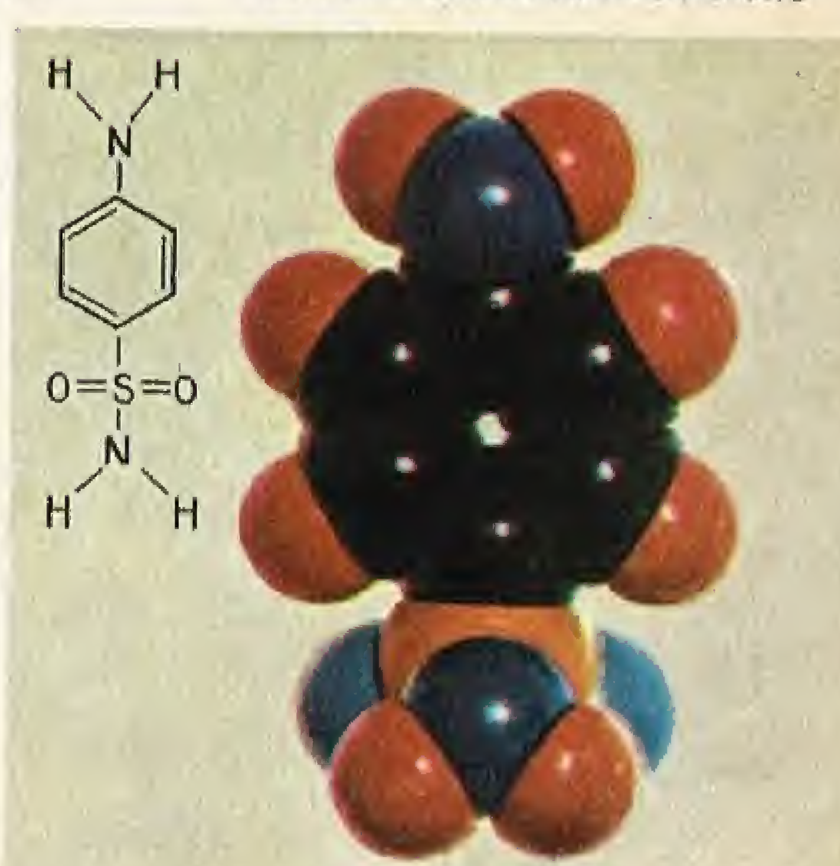
12. Para-clorobromobenceno



3. Cloruro del ácido para-toluenosulfónico



14. Naftaleno



15. Para-aminofenilsulfonilamida

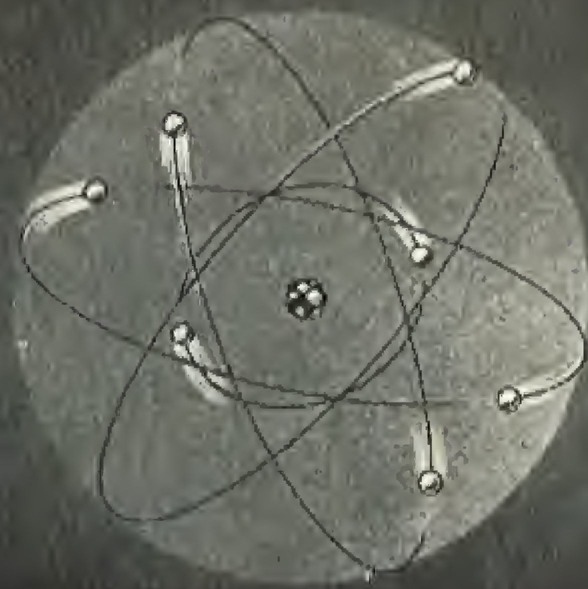
ÁTOMOS

CONSTITUCIÓN

Toda la materia está constituida por átomos que constan de un núcleo a base de protones y neutrones, y de una corona de electrones que gravitan alrededor del núcleo. Damos a continuación las dimensiones de los componentes del átomo :

	Masa en g	Radio en cm	Carga
Protón	$1{,}6 . 10^{-24}$	$1{,}5 . 10^{-13}$	+
Neutrón	$1{,}6 . 10^{-24}$	$1{,}5 . 10^{-13}$	0
Electrón	$9 . 10^{-28}$	$3 . 10^{-13}$	—
Átomo de hidrógeno	$1{,}6 . 10^{-24}$	$5 . 10^{-9}$	0

◄ Damos aquí una imagen, a nuestra escala, del más simple de todos los átomos, el de hidrógeno. Alrededor de una esfera de plomo de 15 metros de diámetro (el núcleo), describiría un círculo de 1 000 kilómetros de diámetro un globo lleno de aire de 30 metros de diámetro (el electrón). Toda la masa está prácticamente reunida en el núcleo, por lo que el átomo está casi exclusivamente vacío.



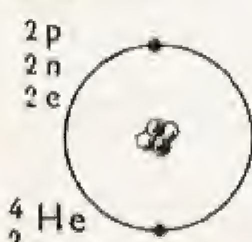
Esquema de un átomo de nitrógeno

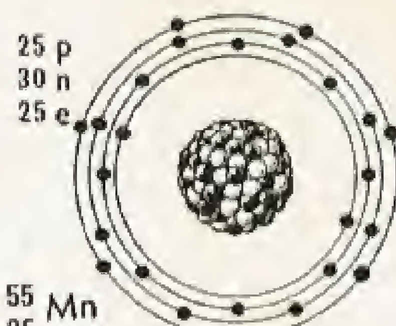
CLASIFICACIÓN

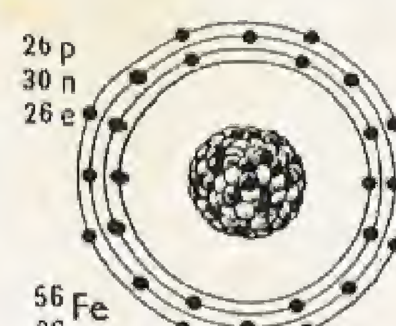
Los elementos se clasifican según el número de protones del núcleo, que es igual al de los electrones de la corona periférica del átomo no ionizado (cf. *El átomo*, p. 434). A cada elemento le pueden corresponder varios « isótopos » con el mismo número de protones y de electrones, y diferentes sólo por el número de neutrones del núcleo. Los isótopos de un mismo elemento tienen las mismas propiedades químicas (cf. *El átomo*, p. 434).

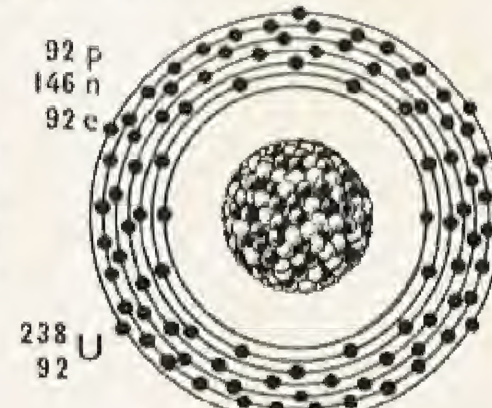
PROTÓN, p ● — NEUTRÓN, n ○ — ELECTRÓN, e •











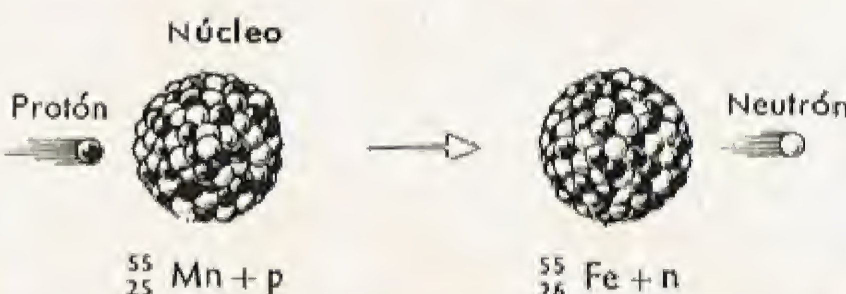
QUÍMICA NUCLEAR

La mayor parte de las propiedades usuales de los elementos : color, dureza, afinidad química, etc., dependen exclusivamente de la corona electrónica. Ahora bien, si a los electrones periféricos corresponde la química clásica, orgánica o mineral, al núcleo corresponde la química nuclear : transmutación de los elementos, radiactividad natural o artificial.

En la química nuclear, los agentes de reacción no son ya los ácidos y las bases, sino las partículas, neutrones, protones, etc., suministradas por las pilas atómicas, los ciclotrones, los Van de Graaf de los laboratorios especializados. Damos a continuación como ejemplo de reacción nuclear la transmutación de manganeso en hierro radiactivo.

TRANSMUTACIÓN

Si un protón animado de gran velocidad choca contra un átomo de manganeso, se forma en un intervalo de tiempo extremamente corto un núcleo excitado que contiene un protón más que el núcleo de $^{55}_{25}$Mn : se trata de un núcleo $^{56}_{26}$Fe. Este núcleo se « desexcita » por emisión de un neutrón, y da así otro isótopo del hierro, el $^{55}_{26}$Fe. Éste es relativamente mucho más estable, puesto que su vida media es de tres años.

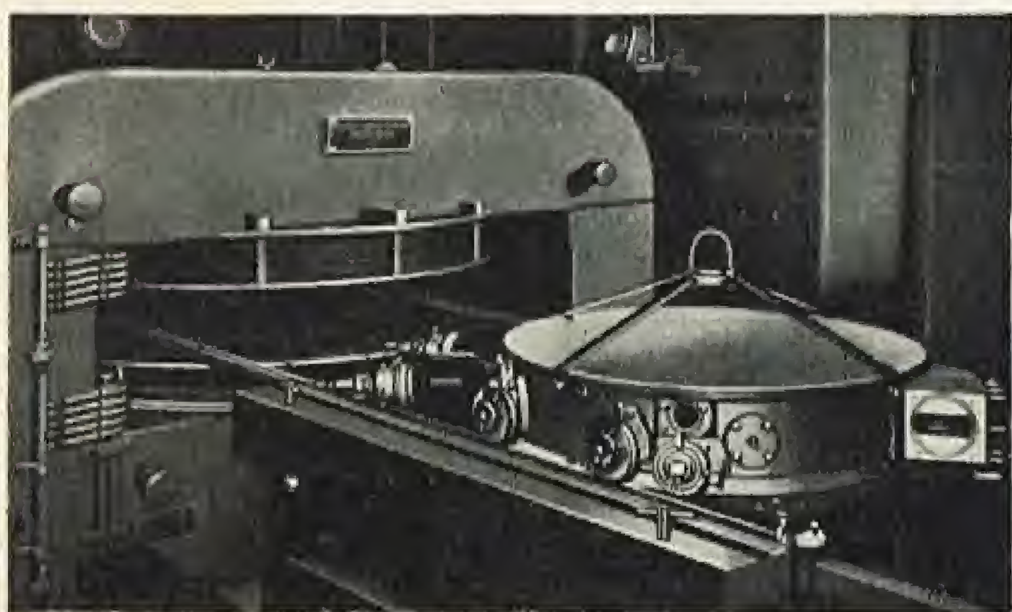


Por una reacción análoga, se obtiene el cobalto radiactivo irradiando cobalto en una pila atómica. La reacción es la siguiente : $^{59}_{27}Co = n \rightarrow ^{60}_{27}Co$.

La mitad de este cobalto 60 radiactivo se destruye en cinco años, dando níquel : $^{60}_{27}Co \rightarrow ^{60}_{28}Ni + e + \gamma$.

Los rayos gamma, muy penetrantes, emitidos en estas condiciones, son utilizados en radioterapia, radiofotografía, etc.

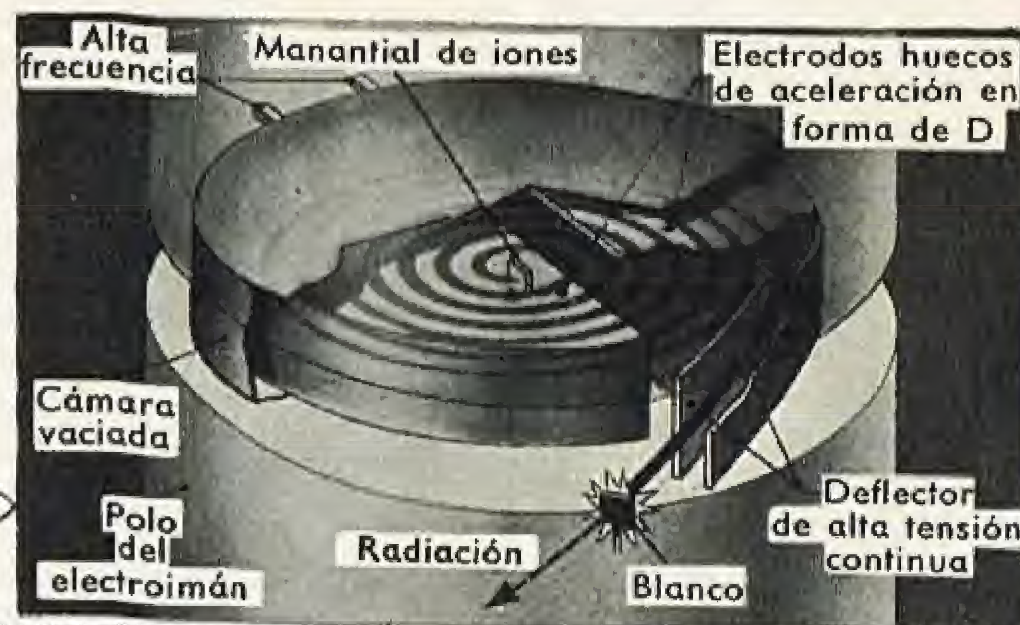
La transmutación de manganeso en hierro puede realizarse por los protones de un ciclotrón. Los protones (núcleos de hidrógeno) giran describiendo espirales en un campo magnético intenso y son acelerados a cada rotación por un campo eléctrico variable hasta que, finalmente, vienen a chocar contra un blanco de manganeso situado en el interior del aparato. El hierro que se forma, en pequeña cantidad (del orden de una diezmillonésima de microgramo por gramo de manganeso) es radiactivo, lo que permite caracterizarlo una vez separado del manganeso.



Modelo de ciclotrón

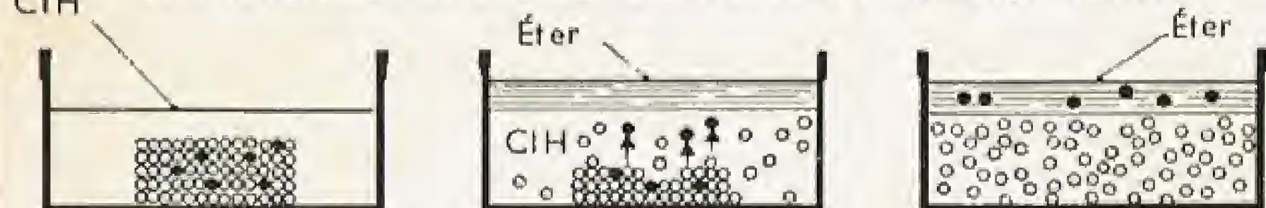
— Campo magnético 21 000 gauss.
— Entrehierro : 9 cm por 80 cm de diámetro. A la izquierda de la fotografía se distinguen las piezas polares del electroimán, de donde se ha extraído la caja de aceleración, visible a la derecha.

Esquema de un ciclotrón



RADIOQUÍMICA

El estudio de las propiedades del $^{55}_{26}$Fe exige que se separen del blanco de manganeso los vestigios de hierro formado. Esta separación se efectúa recurriendo a la química clásica.



El blanco se disuelve en ácido clorhídrico concentrado; a continuacion se añade éter y se agita

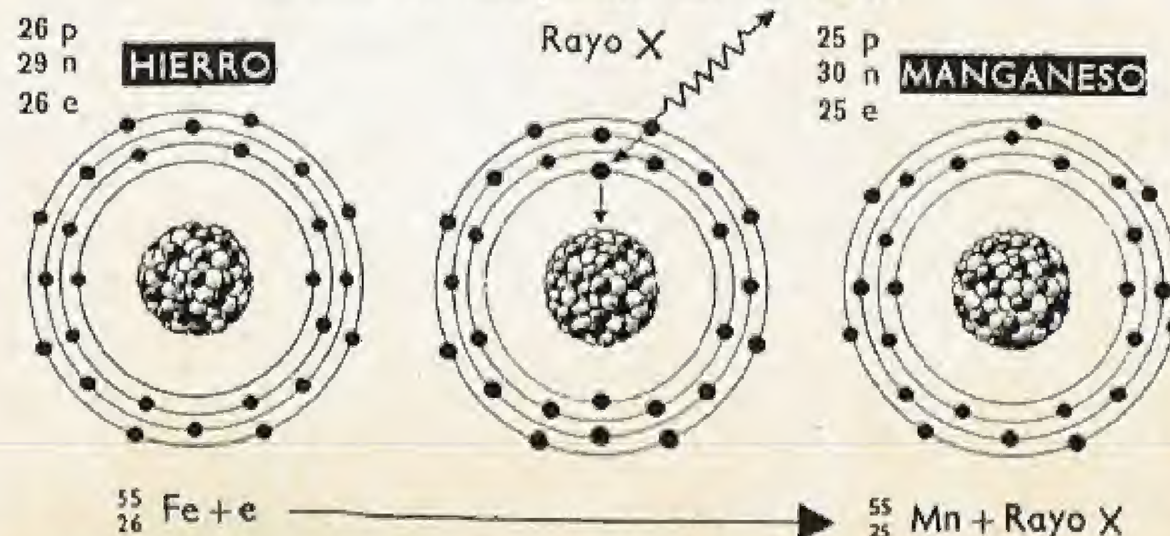
Los átomos de hierro pasan a la capa de éter, mientras que el manganeso permanece en solución



Se separa el éter por decantación, se le evapora y se recuperan los vestigios de hierro, que se caracterizan fácilmente por su radiactividad específica

RADIACTIVIDAD

El $^{55}_{26}$Fe se transforma espontáneamente en $^{55}_{25}$Mn, estable. Esta radiactividad artificial se caracteriza por la captura de un electrón de la corona por el núcleo de $^{55}_{26}$Fe, a la que sigue la emisión de un rayo X de una energía característica del átomo de manganeso así formado.



Los ácidos bromhídrico y yodhídrico reaccionan con mayor facilidad que el ácido clorhídrico; éste requiere a veces que se opere a presión.

b) Por efecto de los **agentes halogenantes,** tales como los *cloruros, bromuros y yoduros de fósforo,* el *cloruro de tionilo,* etc.

Propiedades físicas. — En general, los halogenuros de alcohilo son líquidos, de olor agradable, insolubles en el agua; excepcionalmente, son gaseosos. Los puntos de ebullición y las densidades aumentan y la estabilidad disminuye cuando se pasa sucesivamente de los cloruros a los bromuros y a los yoduros correspondientes. Tienden a descomponerse por el calor, y se alteran rápidamente a la luz.

Propiedades químicas. — a) *Ionización.* Al contrario de lo que sucede con las sales metálicas correspondientes, los derivados halogenados se *disocian* muy poco. Sin embargo, precipitan las sales de plata al cabo de largo tiempo. Como norma general, los yoduros, que son los más disociados, reaccionan con mayor facilidad que los bromuros, y éstos, a su vez, tienen mayor tendencia a la reacción que los cloruros.

b) *Paso a las funciones de la misma clase.* Los derivados halogenados dan fácilmente **alcoholes,** por simple hidrólisis con álcalis diluidos. Esta reacción es precisamente la inversa de la que permite obtenerlos:

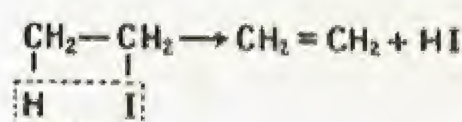


$$R-I + Na-OH \longrightarrow R-OH + NaI$$

La transición a las **aminas** se efectúa por acción del amoniaco (v. p. 324), mientras que los **mercaptanos** y los **tioéteres** se obtienen por reacción de los sulfhidratos y de los sulfuros alcalinos con los halogenuros de alcohilo (v. p. 324).

La eliminación de una molécula de ácido yodhídrico en el yoduro permite obtener los **hidrocarburos etilénicos.** La reacción se efectúa por tratamiento con álcalis *concentrados.*

Para formular la reacción, conviene poner de relieve la posición del carbono funcional, así como la del carbono vecino. El yoduro de etilo se transforma así en etileno



$$CH_2-CH_2 \longrightarrow CH_2=CH_2 + HI$$

El ácido yodhídrico desprendido en la reacción se fija mediante un álcali.

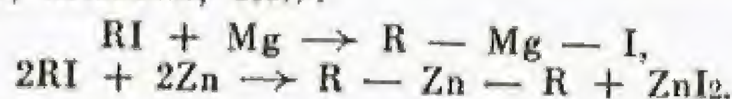
Esta reacción es perfectamente comparable a la deshidratación de los alcoholes. Obsérvese que un yoduro *terciario* pierde una molécula de hidrácido con la misma facilidad con que un alcohol terciario pierde una molécula de agua.

c) *Reducción.* Por *hidrogenación,* los derivados halogenados conducen a los hidrocarburos correspondientes:



$$R-I + H-H \longrightarrow R-H + HI$$

Por otra parte, reaccionan con el magnesio y con el cinc, dando las sales de **alcohilmagnesio** y de **cincalcohilo,** respectivamente. Son numerosos los metales que pueden dar lugar a combinaciones de este tipo (estaño, plomo, mercurio, etc.):



$$RI + Mg \longrightarrow R-Mg-I,$$
$$2RI + 2Zn \longrightarrow R-Zn-R + ZnI_2.$$

d) *Síntesis de Wurtz.* Recordemos la acción del sodio (v. p. 599), que conduce a los hidrocarburos saturados sintéticos:



$$2RI + 2Na \longrightarrow R-R + 2NaI.$$

e) *Acción sobre los derivados del sodio.* Los halogenuros de alcohilo, de manera especial los yoduros, reaccionan con todos los *derivados del sodio y las sales sódicas,* provocando la eliminación de halogenuro de sodio. Estas reacciones son muy importantes, pues permiten la alcohilación de las moléculas.

Así, los alcoholatos dan lugar a los éteres (v. p. 324), las sales de los *ácidos* orgánicos a los **ésteres**



$$R-CO_2-Na + I-R' \longrightarrow R-CO_2R' + NaI$$

y los *cianuros alcalinos* a los **nitrilos**



$$R-I + Na-C\equiv N \longrightarrow R-C\equiv N + NaI$$

Términos principales. — El *cloruro,* el *bromuro* y el *yoduro* de metilo hierven a — 24° C, 4° C y 43° C, respectivamente.

El *cloruro de etilo* se evapora rápidamente con absorción de calor; el frío producido insensibiliza los tejidos y sirve así como anestésico local.

Derivados organometálicos

Generalidades. — Los derivados organometálicos se obtienen exclusivamente por síntesis, al hacer reaccionar los metales o ciertas aleaciones con los halogenuros de alcohilo. En realidad, se trata de productos resultantes de la *reducción* de estos cuerpos.

Se dividen en derivados **mixtos,** cuya molécula contiene halógeno, y derivados **simples,** que contienen solamente radicales carbonados.

Los derivados *organomagnesianos mixtos,* cuya fórmula general es R . Mg — X (X representa el halógeno), revisten una importancia capital en las síntesis orgánicas. Los derivados mixtos del **cinc,** R — — Zn — X, son utilizados en ciertas reacciones.

Los ejemplos siguientes facilitarán la comprensión de la nomenclatura de estos compuestos: CH_3 — Mg — Br es el bromuro de metilmagnesio, C_2H_5 — Zn — I el yoduro de etilcinc, $(C_2H_5)_2Zn$ el cinc dietilo, etcétera.

Derivados organomagnesianos mixtos

Preparación. — Los derivados organomagnesianos, o sales de alcohilmagnesio, descubiertos por Grignard, se obtienen por reacción del magnesio en cinta o en polvo con el halogenuro de alcohilo correspondiente. El metal divalente se adiciona pura y simplemente:



$$R-Br + Mg \longrightarrow R-Mg-Br.$$

Para llevar a cabo este tipo de reacciones, *es preciso operar en presencia de éter anhidro,* que activa el metal, *y en ausencia completa de agua.*

El éter forma con la sal de alcohilmagnesio un *complejo* que se disuelve en el disolvente. Se observa, pues, que el magnesio desaparece a medida que la reacción se prosigue.

Modo de empleo de las sales de alcohilmagnesio. — En general, casi nunca interesa *aislar* la sal de alcohilmagnesio así obtenida; en la mayoría de los casos, se introduce en el mismo balón que contiene el cuerpo sobre el que se desea provocar la reacción.

En este tipo de reacciones, el reactivo de Grignard se escinde siempre en dos restos monovalentes, R — y — MgX, los cuales se fijan ya en dos radicales diferentes (reacciones de doble descomposición), ya en una misma molécula (reacciones de adición).

En todos los casos, se *termina la operación tratando con agua el contenido del balón.*

Si se representa el nuevo compuesto obtenido por A — Mg — X, su descomposición por el agua se efectuará de acuerdo con la ecuación



$$\begin{matrix} H-OH \\ +\,A-MgX \end{matrix} \longrightarrow AH + Mg\begin{matrix} / X \\ \backslash OH \end{matrix}$$

El esquema X — Mg — OH no corresponde a cuerpo mineral definido alguno; en realidad simboliza la mezcla equimolecular de halogenuro MgX_2 e hidróxido de magnesio $Mg\begin{matrix} / OH \\ \backslash OH \end{matrix}$.

Dividiremos las reacciones de las sales de alcohilmagnesio en dos grupos, según que no *modifiquen* o que *modifiquen* la cadena carbonada del radical R unido al magnesio.

Reacciones que no modifican la cadena carbonada. — a) *Acción del agua.* El agua descompone instantáneamente las sales de alcohilmagnesio, poniendo en libertad el **hidrocarburo saturado** R — H.



$$R-MgX + OH-H \longrightarrow R-H + MgXOH$$

Se logra así realizar fácilmente la reducción de los derivados halogenados (v. p. 599, a). Esta reacción muestra que se debe efectuar la preparación del reactivo en ausencia de humedad.

b) *Cuerpos con hidrógeno ácido.* Todos los cuerpos que poseen un átomo de hidrógeno con carácter ácido reaccionan como el agua y destruyen el magnesio; tal es el caso del alcohol.

Los *hidrocarburos acetilénicos monosubstituidos* dan lugar a los derivados magnesianos de estos compuestos, que son utilizados como agentes de síntesis (v. columna anterior).

c) *Acción de los halógenos.* El yodo provoca una doble descomposición de los derivados orgánicos del magnesio clorados y bromados, originando los yoduros de alcohilo correspondientes, de acuerdo con la ecuación:



$$R-Mg-Cl + I-I \longrightarrow R-I + MgICl$$

MgICl simboliza la mezcla equimolecular



$$MgCl_2 + MgI_2.$$

d) *Acción del oxígeno.* El oxígeno se fija por adición:



$$R-Mg-X + O \longrightarrow R-O-Mg-X.$$

Se obtiene así un **alcoholato** de magnesio, que es descompuesto por el agua en R — OH y MgXOH.

e) *Acción del azufre.* El azufre da lugar a los **mercaptanos** R — SH (compárese con la acción del oxígeno que conduce a los alcoholes R — OH).

Reacciones que modifican la cadena carbonada. — Estas reacciones, muy importantes, permiten realizar numerosas síntesis. Comprenden:

La *doble descomposición* con los derivados halogenados;

Las reacciones de *adición* en los enlaces múltiples carbono-oxígeno y carbono-nitrógeno.

Las sales de alcohilmagnesio **no se fijan** *en los enlaces etilénicos o acetilénicos.*

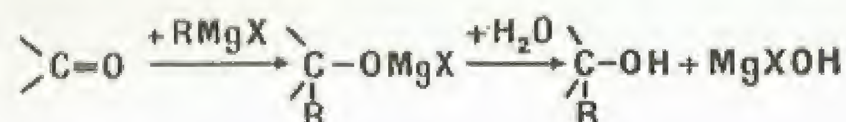
Reacción con los derivados halogenados. — Esta reacción permite obtener los hidrocarburos correspondientes por vía sintética.



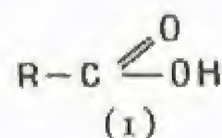
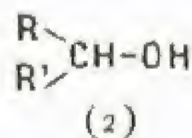
$$R-MgX + X-R' \longrightarrow R-R' + MgX_2$$

Este proceso es equivalente a la reacción de Wurtz (acción del sodio sobre una mezcla de yoduros de alcohilos), pero el resultado es más seguro y más fácil de obtener.

Adición en el enlace carbono-oxígeno. — El doble enlace $>C = O$ fija una molécula de derivado de magnesio. El radical R se liga al átomo de carbono. Las transformaciones son las siguientes:



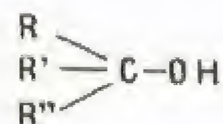
En estas condiciones:
El **anhídrido carbónico** $O = C = O$ conduce a los ácidos (1).
Los **aldehídos** $R' - CH = O$ dan los **alcoholes secundarios** (2).

(1) (2)

(La única excepción es la que ofrece el aldehído fórmico, que da origen al alcohol primario $R - CH_2OH$.)

Las **cetonas** $\begin{matrix} R' \\ R'' \end{matrix} > C = O$ conducen a los **alcoholes terciarios**



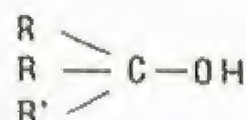
Los **cloruros de ácido** y los **ésteres** *de los ácidos orgánicos* reaccionan en dos fases.

Primeramente, se forma una *cetona* por acción de una sola molécula de la sal de alcohilmagnesio.





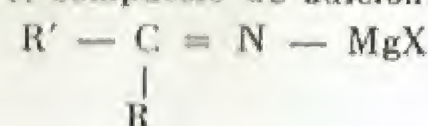
La cetona así obtenida reacciona normalmente con la segunda molécula del reactivo, y se forma el **alcohol terciario.**



(Naturalmente, a partir del formiato de etilo se obtendría un alcohol secundario, $R - CHOH - R$.)

Adición en los enlaces carbono-nitrógeno. — Nos limitaremos a mencionar la acción de las sales de alcohilmagnesio sobre los **nitrilos** $R - C \equiv N$.

El agua descompone el compuesto de adición

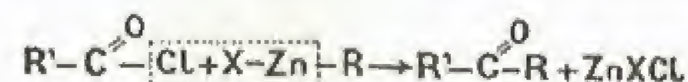


en una imina $\begin{matrix} R' \\ R \end{matrix} > C = NH$, cuerpo inestable que se hidroliza en la **cetona** $\begin{matrix} R' \\ R \end{matrix} > C = O$ y en amoniaco NH_3.

Derivados orgánicos mixtos del cinc

La preparación de estos derivados $R - Zn - X$, también llamados sales de cincalcohilo, es casi análoga a la que permite obtener las sales de alcohilmagnesio.

Son menos activos que éstas, y *no reaccionan con las cetonas.* A partir de estos compuestos y de los cloruros de ácido, se logran numerosas síntesis. La reacción se reduce a la doble descomposición



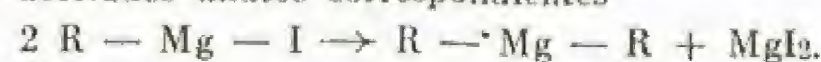
Derivados organometálicos simples

Para obtener los derivados simples de magnesio y de cinc, basta con calentar los derivados mixtos correspondientes

$$2\,R - Mg - I \longrightarrow R - Mg - R + MgI_2.$$

La manipulación de estos compuestos es delicada; se inflaman espontáneamente.

El *tetraetilplomo* $(C_2H_5)_4Pb$ es un derivado organometálico que se obtiene por reacción del bromuro de etilo C_2H_5Br sobre una aleación de plomo y sodio. Si se adiciona en pequeña dosis a la gasolina, actúa como *antidetonante*, lo que permite aumentar el rendimiento del motor, pues entonces resulta posible utilizar una compresión mayor.



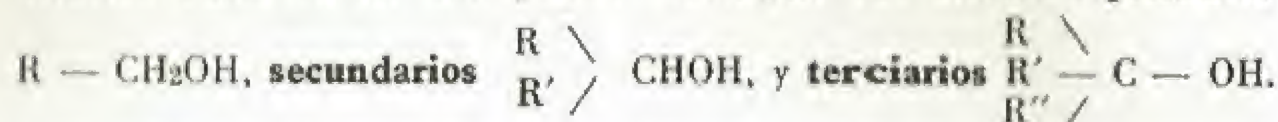
Alcoholes

Generalidades. — Los **alcoholes** saturados se caracterizan por el radical funcional hidroxilo (u oxhidrilo) — OH. La fórmula general de estos compuestos es $C_nH_{2n+1} - OH$. Generalmente, un alcohol saturado cualquiera se representa por el esquema $R - OH$, que pone de

Un laboratorio de alquimia en el siglo XVI, según P. Brueghel (Fot. Giraudon)



manifiesto su constitución referida al agua. Sin embargo, a veces es necesario formular de manera más precisa el carbono funcional; la notación usada en tal caso permite distinguir los alcoholes **primarios**



$R - CH_2OH$, **secundarios** $\begin{matrix} R \\ R' \end{matrix} \rangle CHOH$, y **terciarios** $\begin{matrix} R \\ R' - C - OH. \\ R'' \end{matrix}$

(Los símbolos R representan los radicales carbonados monovalentes.) En una cadena con el mismo número de átomos de carbono, los alcoholes presentan un número mayor de isómeros que los hidrocarburos saturados correspondientes, puesto que la función puede ocupar posiciones múltiples (v. p. 595).

Estado natural. — Los alcoholes se encuentran rara vez en forma libre en la naturaleza. Generalmente, están combinados con los ácidos en forma de ésteres (v. p. 327) o entre sí en forma de éteres (v. página 324).

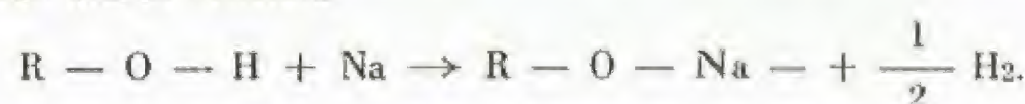
Propiedades físicas. — Ninguno de estos alcoholes es gaseoso a la temperatura ordinaria; son líquidos hasta el término 10, y los superiores son sólidos, con puntos de fusión poco elevados. La variación del punto de ebullición entre los homólogos es del orden de 20° C.

Los alcoholes terciarios, cuya cadena está más ramificada, hierven a temperaturas más bajas que los alcoholes secundarios, y éstos, a su vez, a temperaturas inferiores a las de los primarios.

La densidad de los alcoholes es inferior a 1; los primeros términos se mezclan bien con el agua, pero esta solubilidad disminuye rápidamente a partir del cuarto término de la serie. Se disuelven en la mayor parte de los disolventes orgánicos.

Propiedades químicas generales de la función alcohol. — a) *Acidez del hidrógeno.* El hidrógeno de la función alcohol puede ser reemplazado por un metal alcalino o alcalinotérreo. Por lo tanto, presenta carácter **ácido.**

Así, el sodio provoca el desplazamiento del hidrógeno de un alcohol, de acuerdo con la ecuación



$$R - O - H + Na \rightarrow R - O - Na - + \frac{1}{2} H_2.$$

La combinación formada se llama **alcoholato de sodio.**

No se pueden comparar estos cuerpos con las sales de los ácidos; en efecto, se descomponen inmediatamente por el agua, que regenera el alcohol, formando además hidróxido sódico:

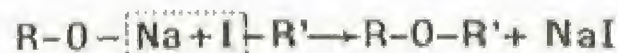


$$R\text{-}O\text{-}\boxed{Na + H\text{-}O}\text{-}H \rightarrow R\text{-}O\text{-}H + NaOH$$

La acción del sodio sobre un alcohol es mucho menos violenta que sobre el agua.

Los alcoholatos de sodio ofrecen gran interés para las síntesis orgánicas, pues reaccionan fácilmente con los derivados halogenados en el sentido que determina la eliminación de una molécula de halogenuro de sodio y permite así la *ligadura de los dos radicales orgánicos.*

En particular, los alcoholatos conducen a la formación de los éteres:



$$R\text{-}O\text{-}\boxed{Na + I}\text{-}R' \rightarrow R\text{-}O\text{-}R' + NaI$$

b) *Esterificación.* Los alcoholes reaccionan con los ácidos minerales u orgánicos, formando los **ésteres,** por eliminación de agua.

El alcohol $R - OH$ reacciona por su hidroxilo con el ácido bromhídrico:



$$R\text{-}\boxed{OH + H}\text{-}Br \rightarrow R\text{-}Br + HOH$$

mientras que con el ácido acético no reacciona sino por su hidrógeno:



$$R\text{-}O\boxed{H + H\text{-}O}\text{-}CO\text{-}CH_3 \rightarrow R\text{-}O\text{-}CO\text{-}CH_3 + HOH$$

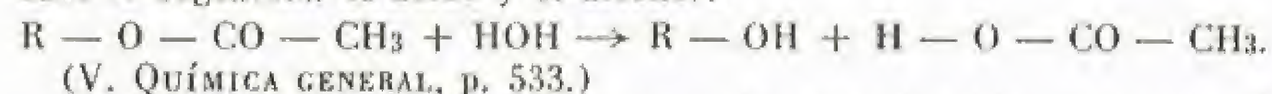
Los compuestos así obtenidos son los ésteres minerales u orgánicos.

La reacción de *esterificación* tiene cierta semejanza con la *salificación* de una base por un ácido:



$$Na\text{-}\boxed{OH + H}\text{-}Br \rightarrow NaBr + HOH$$

pero se distingue de ésta en que ni es **instantánea,** ni **total.** La esterificación es una reacción de **equilibrio,** limitada por la reacción **inversa,** que se denomina **hidrólisis** o **saponificación,** y en el transcurso de la cual se regeneran el ácido y el alcohol:



$$R - O - CO - CH_3 + HOH \rightarrow R - OH + H - O - CO - CH_3.$$

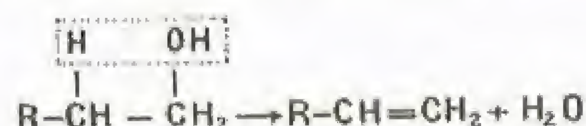
(V. QUÍMICA GENERAL, p. 533.)

La diferencia entre la salificación y la esterificación reside en el hecho de que la base NaOH está disociada electrolíticamente y reacciona por medio de los iones OH^-; por su parte, la disociación del alcohol es ínfima.

El rendimiento de las esterificaciones aumenta si se añade ácido sulfúrico concentrado o ácido clorhídrico gaseoso seco.

La saponificación es completa por acción de los ácidos minerales o, lo que aún es mejor, de las bases.

c) *Deshidratación.* Es posible eliminar el hidroxilo del alcohol junto con un átomo de hidrógeno captado en el carbono adyacente, lo que forma agua por una parte, y por otra crea un **doble enlace etilénico,** tal como se expresa en la fórmula siguiente:



$$R\text{-}\underset{|}{\overset{H}{CH}} - \underset{|}{\overset{OH}{CH_2}} \rightarrow R\text{-}CH{=}CH_2 + H_2O$$

La reacción se efectúa en presencia de un deshidratante, tal como el ácido sulfúrico.

La deshidratación puede efectuarse también de otra manera; en este caso, se elimina **una** molécula de agua a partir de **dos** de alcohol, obteniéndose así el **éter:**

Influencia del grado de substitución de los alcoholes en las reacciones. — El **rendimiento** de las reacciones de **esterificación,** realizadas calentando los alcoholes con un ácido orgánico, disminuye considerablemente cuando se pasa de un alcohol *primario* a un alcohol *secundario,* y es casi nulo con los alcoholes *terciarios* (naturalmente, a igualdad en la longitud de la cadena carbonada).

La **deshidratación** de los alcoholes *terciarios,* que da lugar a los hidrocarburos etilénicos correspondientes, se efectúa generalmente por calentamiento.

Estas reacciones permiten *diferenciar los alcoholes en función del grado de substitución.* Otro tanto ocurre con las reacciones de oxidación.

Reacciones de oxidación de los alcoholes. — Si se provoca la reacción de un oxidante sobre un alcohol primario, secundario o terciario, el alcohol **primario** $R - CH_2OH$ conduce primeramente a la obtención del **aldehído** $R - \overset{/\!/ O}{C} - H$, por pérdida de dos átomos de hidrógeno, y ulteriormente a la del **ácido**



$$R - \overset{/\!/ O}{C} - O - H;$$

el alcohol **secundario** $\begin{matrix} R \\ R' \end{matrix} \rangle CH - OH$ pierde dos átomos de hidrógeno y se transforma en **cetona** $\begin{matrix} R \\ R' \end{matrix} \rangle C = O$; el alcohol **terciario** $\begin{matrix} R \\ R' - C - OH \\ R' \end{matrix}$ no puede dar producto alguno de oxidación que contenga el mismo número de carbono.

Preparación de los alcoholes. — a) *Es posible pasar de las funciones de la misma clase* (derivados halogenados, aminas, hidrocarburos etilénicos) *a los alcoholes;* sin embargo, este método no ofrece interés, puesto que todos estos cuerpos se obtienen precisamente a expensas de los alcoholes.

b) *Métodos de reducción.* La *hidrogenación* de los **aldehídos** conduce a los alcoholes **primarios**



$$R - CHO + H_2 \rightarrow R - CH_2OH.$$

En estas mismas condiciones, las **cetonas** se transforman en alcoholes **secundarios**



$$R - CO - R' + H_2 \rightarrow R - CHOH - R'.$$

En la práctica, este método se aplica exclusivamente a las cetonas, pues los aldehídos son en general bastante poco abundantes.

La reacción a partir de las cetonas se realiza ya por vía química, utilizando una mezcla que desprenda hidrógeno en el seno mismo de la reacción, ya por vía catalítica.

Con este fin, se puede emplear el *método* de Sabatier y Senderens, que consiste en provocar el paso del compuesto, en forma de vapor y mezclado con hidrógeno, a través de un tubo calentado a 200° C, cuya pared interior está cubierta con una capa de níquel finamente dividido procedente de la reducción del óxido NiO en el tubo mismo.

A la salida, se condensan los vapores de alcohol.

La **reducción de los ácidos** origina los alcoholes primarios. Para llevarla a cabo, es preciso que el hidrógeno se encuentre a presión muy elevada:



$$R - CO_2H + 2H_2 \rightarrow R - CH_2OH + H_2O.$$

La reacción es mucho más fácil de lograr si se reemplaza el ácido por un éster etílico (v. p. 327).

c) *Métodos sintéticos.* Se puede realizar la síntesis de los alcoholes primarios, secundarios y terciarios por medio de las **sales de alcohilmagnesio.**

Estudio de los términos principales. — El *alcohol metílico,* CH_3OH, o *metanol,* es el más simple de todos los alcoholes. Se encuentra en los productos de destilación de la madera, lo que justifica su antiguo nombre de *espíritu de madera.* Existe en forma de éteres en numerosos vegetales.

Se puede obtener por síntesis total, mediante reacción del óxido de carbono con el hidrógeno, en presencia de óxido de cinc como catalizador:



$$CO + 2H_2 \rightarrow H - CH_2OH.$$

Es un líquido muy móvil, de sabor cáustico, que se mezcla fácilmente con el agua. Hierve a 67° C. Se utiliza como disolvente y como agente de *metilación* (introducción del grupo metilo en una molécula).

El *alcohol etílico* $CH_3 - CH_2OH$, *etanol* o *espíritu de vino,* es el alcohol primario homólogo superior del precedente. Se obtiene exclusivamente en la *fermentación alcohólica* de los zumos de frutas azucarados; en efecto, la *glucosa* y la *fructosa,* $C_6H_{12}O_6$, se desdoblan por efecto de la *diastasa* segregada por ciertas *levaduras,* de acuerdo con la ecuación:



$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2.$$

Estos azúcares, fermentescibles, proceden en la mayor parte de los casos del desdoblamiento previo de otros azúcares no fermentescibles, más complejos. Así, el azúcar de caña o de remolacha, $C_{12}H_{22}O_{11}$, se **hidrata** primero, se escinde luego por influencia del fermento llamado *invertasa*



$$C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O \rightarrow \underset{\text{glucosa}}{C_6H_{12}O_6} + \underset{\text{fructosa}}{C_6H_{12}O_6}$$

y se transforma en azúcares fermentescibles.

En ciertas condiciones, el *almidón* de los granos puede transformarse en glucosa fermentescible, lo que permite obtener los aguardientes de granos.

En las fermentaciones industriales, además del alcohol etílico se forman glicerina y alcoholes superiores de mal gusto, que constituyen el aceite de *fusel*.

Estos cuerpos se separan por destilación fraccionada.

El alcohol etílico puro o *absoluto* hierve a 78.3° C; se mezcla con el agua en todas las proporciones. Cuando se destila una mezcla de agua y alcohol, no se logra separar el alcohol puro. El producto destilado que hierve a temperatura fija contiene 5% de agua aproximadamente (azeotropismo). Por consiguiente, es preciso emplear métodos especiales para preparar el alcohol absoluto.

El alcohol etílico sirve como combustible y como carburante (alcohol absoluto) mezclado con la gasolina o con el benzol. Se utiliza también para la preparación de vinagre, de los éteres y de diversos compuestos orgánicos. Su empleo como disolvente es muy importante.

Entre los alcoholes superiores, citaremos los alcoholes **propílicos** C_3H_8O o propanoles, **butílicos** $C_4H_{10}O$, **amílicos** $C_5H_{12}O$ y **hexílicos** $C_6H_{14}O$.

Los términos contenidos en el aceite de fusel sirven para la preparación de los ésteres utilizados en perfumería.

Éteres

Generalidades. — Los **éteres,** cuya fórmula general es R — O — — R', se derivan teóricamente del agua, mediante substitución de dos átomos de hidrógeno por dos radicales carbonados. *Los éteres se llaman* **simples** *o* **simétricos** *cuando contienen dos radicales idénticos y* **mixtos** *cuando constan de dos radicales diferentes.*

Ahora bien, si se considera que la parte fundamental del compuesto es la constituida por los restos orgánicos, se puede imaginar que los éteres son los **óxidos** de alcohilo. Así, el cuerpo $C_2H_5 — O — C_2H_5$ es el óxido de etilo (o éter dietílico). El éter mixto $C_2H_5 — O — CH_3$ es el óxido de metilo y de etilo. Estos compuestos no existen en la naturaleza.

Preparación. — *a*) En general, los *éteres simples* se preparan por deshidratación de los alcoholes (v. p. 323).



$$C_2H_5-OH+H-O-C_2H_5 \rightarrow C_2H_5-O-C_2H_5+H_2O$$

Generalmente, se emplea con tal fin el ácido sulfúrico. En realidad, el ácido esterifica el alcohol, y el sulfato ácido $SO_4HC_2H_5$ así formado reacciona con una segunda molécula de alcohol, dando origen al éter y regenerando el ácido sulfúrico:



$$C_2H_5-SO_4H+H-O-C_2H_5 \rightarrow C_2H_5-O-C_2H_5+SO_4H_2$$

b) Los *éteres mixtos* se obtienen por reacción de un alcoholato de sodio con un derivado yodado (v. p. 323 *a*).



$$C_2H_5-O-Na+I-CH_3 \rightarrow C_2H_5-O-CH_3+NaI$$

Propiedades. — El primer término de la serie es gaseoso, y los demás líquidos neutros, poco solubles en el agua. Su olor es agradable.

Desde el punto de vista químico, son poco activos. Al contrario de los ésteres, no se desdoblan por acción de los álcalis.

Óxido de etilo. — El óxido de etilo $C_2H_5 — O — C_2H_5$ *(etoxietano), éter etílico* o *éter ordinario*, es conocido comercialmente con el nombre de *éter sulfúrico*, denominación impropia que recuerda su preparación. Es un líquido móvil, *muy inflamable*, que hierve a 35° C. Se utiliza como anestésico y como disolvente.

No hay que confundir este cuerpo con el *éter de petróleo*, constituido por una mezcla de hidrocarburos de punto de ebullición bajo extraídos en la destilación de los petróleos brutos.

Mercaptanos y tioéteres

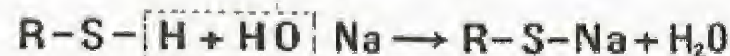
Mercaptanos. — Los *mercaptanos o tioalcoholes*, de fórmula general R — SH, se forman al reaccionar los halogenuros de alcohilo con el sulfhidrato (sulfato ácido) de potasio.



$$C_2H_5-Cl+K-SH \rightarrow C_2H_5-S-H+KCl$$

Estos compuestos son muy volátiles, y poseen un olor repugnante.

El átomo de hidrógeno de los mercaptanos tiene un carácter ácido mucho más marcado que el de los alcoholes. En efecto, los tioalcoholes se combinan con las bases y dan verdaderas sales, llamadas *mercaptidas:*

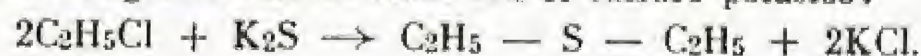


$$R-S-H+HO\ Na \rightarrow R-S-Na+H_2O$$

Reaccionan bien con el óxido de mercurio, formando las sales correspondientes, muy poco solubles; precisamente, los mercaptanos deben su nombre a esta propiedad ("*corpus mercurio aptum*").

El *mercaptano etílico* o *etanotiol*, $C_2H_5 — SH$, hierve a 36° C. Se obtiene industrialmente, pues sirve para la síntesis del hipnótico denominado *sulfonal*.

Tioéteres. — Estos compuestos, de fórmula general R — S — R, que se asemejan por su constitución a los éteres, se obtienen por reacción de los halogenuros de alcohilo con el sulfuro potásico:



$$2C_2H_5Cl + K_2S \rightarrow C_2H_5 — S — C_2H_5 + 2KCl.$$

Son líquidos, y tienen olor etéreo agradable cuando están exentos de impurezas.

Los mercaptanos y los tioéteres dan fácilmente productos de oxidación: *ácidos sulfónicos* ($R — SO_2 — OH$) y *sulfonas* ($R — SO_2 — R$), cuerpos en los que el oxígeno se liga al átomo de azufre. (V. REACCIONES DE CONDENSACIÓN, etc., p. 326.)

(V. REACCIONES DE CONDENSACIÓN, etc., p. 326.)

Aminas

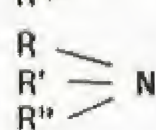
DEFINICIÓN. — **Las aminas,** *descubiertas por Wurtz, son los derivados alcohilados del amoniaco* NH_3. Se dividen en:

Aminas **primarias** (monoalcohiladas), de fórmula general $R — NH_2$;

Aminas **secundarias** (dialcohiladas);



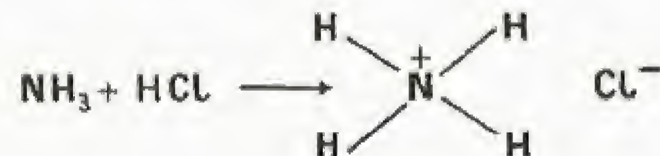
Aminas **terciarias** (trialcohiladas).



En los esquemas precedentes, R, R' y R'' representan radicales monovalentes, idénticos o diferentes.

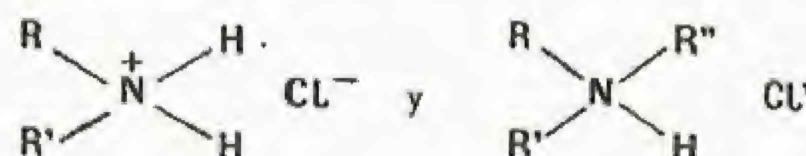
Basicidad. — Al igual que el amoniaco, que se combina por **adición** con los ácidos para dar sales, las aminas ofrecen carácter **básico.**

Es sabido que el amoniaco fija los elementos del ácido clorhídrico, HCl, y se transforma en clorhidrato de amoniaco o cloruro amónico, NH_4Cl.



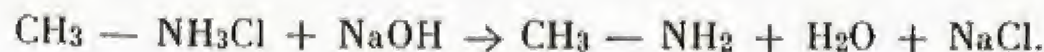
Otro tanto ocurre con la amina $R — NH_2$, que, en las mismas condiciones, se transforma en el clorhidrato $R — NH_3^+Cl^-$, al que se puede considerar como un derivado del cloruro amónico NH_4Cl.

Las fórmulas de los clorhidratos de las aminas secundarias y terciarias son, respectivamente,



La solución acuosa de las aminas *tiñe de azul el tornasol*. Como en el caso del amoniaco, las aminas dan sales dobles con las sales minerales.

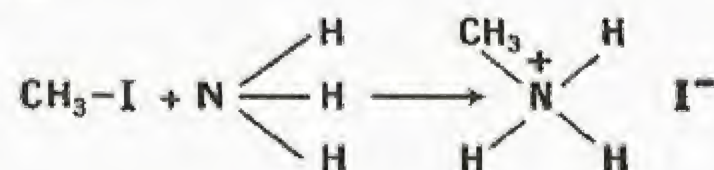
Estas bases son más débiles aún que el amoniaco; así, los álcalis las ponen en libertad fácilmente al reaccionar con una cualquiera de sus sales:



$$CH_3 — NH_3Cl + NaOH \rightarrow CH_3 — NH_2 + H_2O + NaCl.$$

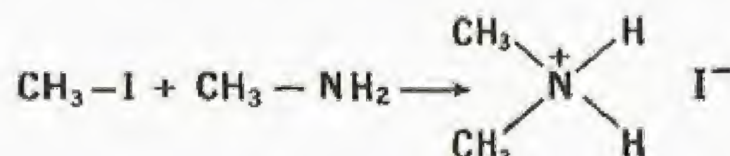
Métodos generales de obtención de las aminas. — Las aminas se forman por acción de los **halogenuros de alcohilo** sobre el **amoniaco.**

Así, el yoduro de metilo, CH_3I, da con el amoniaco, NH_3, un *compuesto de adición*



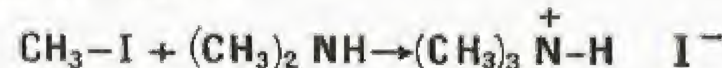
que es el *yodhidrato de la amina* **primaria** $CH_3 — NH_2$ *(metilamina).*

En presencia de un exceso de amoniaco, esta sal libera la amina, que a su vez fija una segunda molécula de yoduro de metilo



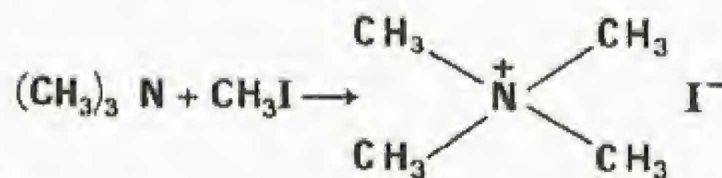
y da el *yodhidrato de la amina* **secundaria** *(dimetilamina)* $(CH_3)_2NH$.

La base, puesta en libertad por el amoniaco, se combina con una tercera molécula de yoduro:



$$CH_3-I + (CH_3)_2NH \rightarrow (CH_3)_3\overset{+}{N}-H \quad I^-$$

lo que permite obtener el *yodhidrato de la base* **terciaria** $(CH_3)_3N$ *(trimetilamina).* La reacción no se termina aquí; en efecto, la amina terciaria puede unirse a su vez con una cuarta molécula del halogenuro de alcohilo



y dar una **sal de amonio cuaternaria** *(yoduro de tetrametilamonio).* A partir de esta fase, el amoniaco no provoca nuevas reacciones.

En resumen, *la acción de un halogenuro de alcohilo sobre el amoniaco conduce a la obtención de una mezcla de aminas primarias, secundarias y terciarias, a la que se añade la sal de amonio cuaternaria.*

OBSERVACIÓN. — Todas las sales de las aminas y las sales cuaternarias se derivan teóricamente de las sales del amoniaco mediante substitución de los átomos de hidrógeno por otros tantos radicales alcohilo.

Otros métodos de preparación. — a) *Degradación de las amidas.* Las amidas R — CO — NH_2 se oxidan cuando son tratadas con los hipocloritos alcalinos, perdiendo así anhídrido carbónico, con lo que se transforman en aminas R — NH_2.

b) *Reducción.* La hidrogenación de los **nitrilos** R — C ≡ N conduce a las aminas R — CH_2 — NH_2; las **oximas** (v. p. 326, *d*) R — CH = = N — OH dan lugar a las mismas bases.

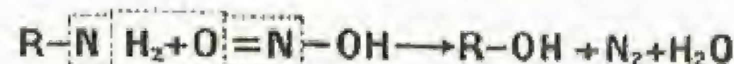
Nomenclatura. — Las aminas se designan enunciando los radicales ligados al nitrógeno: *dimetilamina* $(C_2H_5)_2NH$, *metiletilamina* CH_3 — NH — C_2H_5, etc. (según la nomenclatura de Ginebra, estos compuestos se denominan *dietanoamina, metanoetanoamina,* etc.). Las sales correspondientes son los clorhidratos, bromhidratos, sulfatos, nitratos, carbonatos, etc., de aminas.

Propiedades. — Los dos primeros términos de la serie son gaseosos a la temperatura ordinaria, los medios son líquidos y los superiores sólidos. Son solubles en el agua; la solubilidad decrece con el peso molecular. Son volátiles, especialmente los primeros términos, y su olor se asemeja al del amoniaco. Al contrario de lo que sucede con éste, son combustibles.

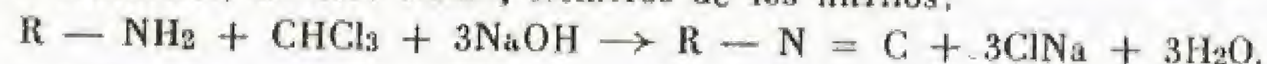
Las sales se presentan en forma sólida, cristalizada, y son solubles en el agua.

La "solubilidad" de estas sales en los ácidos diluidos permite extraer globalmente las bases orgánicas de las mezclas que las contienen.

Entre las propiedades químicas, nos limitaremos a citar la acción del *ácido nitroso* sobre las aminas primarias, que conduce a la formación de *alcoholes*, con desprendimiento de nitrógeno,



y la del *cloroformo* en medio alcalino, que engendra las *carbilaminas* o *isonitrilos*, de olor fétido, isómeros de los nitrilos:



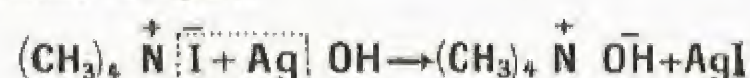
$$R - NH_2 + CHCl_3 + 3NaOH \rightarrow R - N = C + 3ClNa + 3H_2O.$$

Principales términos. — La *metilamina*, CH_3 — NH_2, es gaseosa; hierve a 6° C. Se encuentra principalmente en los productos de destilación de la madera.

Las *etilaminas* son productos de síntesis.

Algunos homólogos superiores de las aminas acíclicas forman parte de los constituyentes de ciertos vegetales.

Bases de amonio cuaternarias. — Si se trata una sal de amonio cuaternaria, tal como $(CH_3)_4N^+I^-$, con hidróxido de plata, AgOH, se elimina yoduro de plata



y el compuesto formado es una base fuerte llamada **hidróxido de amonio cuaternario,** en este caso hidróxido de tetrametilamonio.

Esta base se deriva del hidróxido hipotético NH_4OH, que nunca ha podido ser aislado, pues se deshidrata espontáneamente.

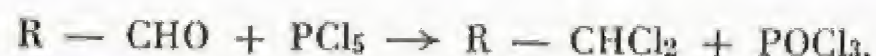
Fosfinas. Arsinas

El **fósforo** y el **arsénico,** que presentan grandes analogías con el nitrógeno, dan los compuestos orgánicos llamados **fosfinas** y **arsinas,** comparables a las aminas.

El ácido cacodílico $(CH_3)_2As$ — OH (con =O sobre As), utilizado en terapéutica, puede ser considerado como un producto resultante de la oxidación de la dimetilarsina.

Derivados dihalogenados aldehídicos y cetónicos

Estos compuestos, cuyas fórmulas generales son R — CHX_2 y R — — CX_2 — R' respectivamente, se obtienen generalmente por reacción de los derivados pentahalogenados del fósforo con los aldehídos y las cetonas.



$$R - CHO + PCl_5 \rightarrow R - CHCl_2 + POCl_3.$$

Entre estos cuerpos, nos limitaremos a citar el cloruro de metileno, CH_2Cl_2, o diclorometano, que hierve a 41° C, y el yoduro de metileno, CH_2I_2, líquido denso (3,28) utilizado para la separación de los minerales de densidad diferente.

Aldehídos y cetonas

Generalidades. — Los **aldehídos** (*al*coholes *deshid*rogenados) se derivan de los *alcoholes primarios*, y las **cetonas** (de *acetona*, nombre del primer término de la serie) proceden de los alcoholes *secundarios*, por pérdida de dos átomos de hidrógeno. La fórmula general de los aldehídos es



$$R - \overset{\displaystyle /\!/ O}{C} - H \text{ o } R - CHO.$$

Las cetonas se dividen en cetonas simples R — C(=O) — R o R — CO — — R, en las que los dos radicales carbonados son idénticos, y en cetonas mixtas R — CO — R', en las que dichos radicales son diferentes.

Isomería. Nomenclatura. — Las *isomerías* de los *aldehídos* y de las *cetonas* son, respectivamente, idénticas a las de los *alcoholes primarios* y *secundarios*.

De acuerdo con la nomenclatura de Ginebra, los aldehídos se caracterizan por la desinencia **al,** y las cetonas por la desinencia **ona.** Así, a los dos alcoholes derivados del propano (propanoles) corresponden un aldehído, el *propanal*, CH_3 — CH_2 — CHO, y una cetona, la **propanona**, CH_3 — CO — CH_3. En general, los aldehídos se designan ya por el nombre de alcohol, ya por el del ácido correspondiente: aldehídos *metílico* o *fórmico* H— CHO, *etílico* o *acético* CH_3 — CHO, *propílico* o *propiónico* CH_3 — CH_2 — CHO.

Las cetonas se designan enunciando los radicales carbonados y posponiendo la palabra cetona: el compuesto CH_3 — CO — CH_3 es la *dimetilcetona;* el compuesto C_2H_5 — CO — CH_3, la *metiletilcetona* (butanona). En ciertos casos, cuando la preparación de las cetonas se efectúa a partir de los ácidos, el nombre de aquéllas se deriva del de éstos. Así, el compuesto CH_3 — CO — CH_3 es la *acetona* (de acético); el C_2H_5 — CO — C_2H_5, la *propiona* (de propiónico), etc.

Propiedades químicas generales. — La presencia del grupo **carbonilo** $\rangle C = O$, en la molécula de los aldehídos y de las cetonas, confiere a estos dos tipos de compuestos ciertas propiedades comunes. Por otra parte, la diferencia en el comportamiento de estos compuestos se debe fundamentalmente a la existencia del átomo de carbono ligado al carbono funcional en el caso de los aldehídos.

El doble enlace carbono-oxígeno presenta analogías con los enlaces etilénicos o acetilénicos: tendencia a la *isomerización*, a la *polimerización*, a la formación de productos de *adición*. La *ruptura* del doble enlace pone en libertad el oxígeno, que puede ser eliminado en presencia de ciertos reactivos (generalmente en forma de agua).

En muchos casos, estas reacciones provocan la ligadura de la cadena carbonada del aldehído o de la cetona con ciertos radicales orgánicos importantes, y se llaman entonces **reacciones de condensación.** Vamos a estudia a continuación las principales reacciones de los aldehídos y las cetonas.

Enolización de los aldehídos y las cetonas. — El doble enlace C = O puede transformarse en doble enlace etilénico por migración de un átomo de hidrógeno, que pasa a ligarse al hidrógeno adyacente. Se obtiene así una forma llamada **enol** (de *oenos*, vino). El aldehído R — CH_2 — C(=O) — H se transforma en el enol R — CH = = CHOH, y la cetona CH_3 — CO — CH_3, en el enol CH_2 = C(OH) — — CH_3.

Aunque los enoles se asemejan a los alcoholes por su constitución, no poseen las propiedades de éstos. Constituyen solamente formas particulares bajo las cuales pueden reaccionar los aldehídos y las cetonas cuando concurren ciertas circunstancias que provocan un fenómeno de isomerización reversible. Estas formas, que corresponden a un solo producto susceptible de ser aislado, se llaman *tautómeras*.

Reacciones de oxidación. — Los **aldehídos** se transforman fácilmente en los ácidos correspondientes por oxidación:



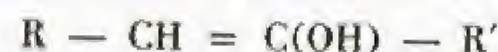
$$R - CHO + O \rightarrow R - \overset{\displaystyle /\!/ O}{C} - OH.$$

Poseen **propiedades reductoras,** y actúan en tal sentido sobre el nitrato de plata amoniacal y sobre el licor de Fehling.

Las **cetonas** *no son reductoras.* No dan lugar por oxidación a compuesto alguno cuya cadena contenga el mismo número de carbonos.

Sin embargo, cuando se tratan con oxidantes enérgicos, se observa una escisión de la molécula en dos fragmentos, en la zona correspondiente a la función.

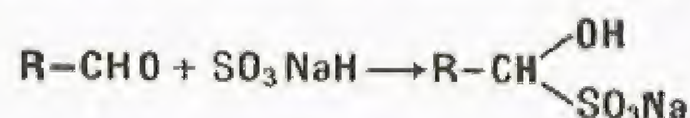
Por lo tanto, se puede admitir que la cetona en forma enólica



$$R - CH = C(OH) - R'$$

se oxida como un compuesto etilénico; en esta reacción se obtienen ácidos o cetonas, según que los carbonos son primarios o secundarios.

Reacciones de adición. — a) *Combinaciones bisulfíticas.* Los **aldehídos** se combinan con el *bisulfito* (sulfito ácido) de sodio, SO_3HNa, por simple contacto con la solución comercial de esta sal:



Las **combinaciones bisulfíticas** obtenidas presentan la forma cristalina; se las separa por filtración.

Ciertas cetonas, en especial las *metilcetonas* del tipo R — CO — — CH_3, originan igualmente combinaciones bisulfíticas. Esta reacción sirve para aislar y purificar los aldehídos y las cetonas, pues el compuesto bisulfítico formado se descompone fácilmente por acción de los ácidos o álcalis diluidos, regenerando aquellos cuerpos.

b) *Hidrogenación.* Como ya hemos visto anteriormente, los aldehídos y las cetonas se transforman en **alcoholes** por fijación de dos átomos de hidrógeno.

c) *Acción de los derivados orgánicos del magnesio.* Recordemos que estos compuestos se ligan en el doble enlace C = O y permiten así la obtención de los alcoholes por síntesis (v. p. 322).

Reacciones de condensación por eliminación de agua. — a) *Alcoholes.* La combinación de dos moléculas de un **alcohol** con un **aldehído** conduce, mediante eliminación de agua, a

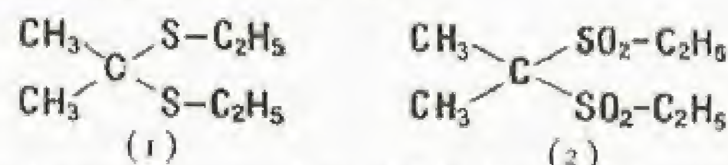


Este compuesto, llamado **acetal,** es un éter de la función R — CH $\begin{smallmatrix}/OH \\ \backslash OH'\end{smallmatrix}$ **hidrato de aldehído,** generalmente inestable. Se da aquí un caso típico de una función inestable en forma libre, y estable en forma de éter.

Las cetonas no provocan esta reacción.

b) *Mercaptanos.* Por una reacción análoga, los mercaptanos reaccionan con los aldehídos y dan los compuestos sulfurados llamados **mercaptales.** Por su parte, las cetonas reaccionan en igual sentido.

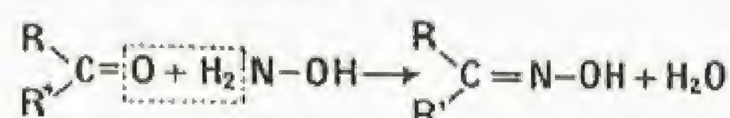
En particular, el etilmercaptano se condensa con la acetona. El mercaptal (1) obtenido puede ser oxidado ulteriormente, obteniéndose así el hipnótico denominado *sulfonal* (2).



c) *Condensaciones diversas.* Los aldehídos y las cetonas pueden reaccionar entre sí e igualmente con otros muchos cuerpos. Daremos varios ejemplos de estos tipos de reacciones cuando tratemos de los aldehídos bencénicos.

Como norma general, los aldehídos presentan mayor afinidad que las cetonas. En particular, dan lugar a productos de masa molecular elevada y de constitución mal definida (resinas), principalmente al reaccionar en presencia de álcalis.

d) *Obtención de los productos cristalizados.* Los aldehídos y las cetonas reaccionan con la *hidroxilamina* NH_2OH, con eliminación de agua; se obtienen así las **oximas:**



Los derivados de la *hidracina* $NH_2 — NH_2$, tales como la fenilhidracina $C_6H_5 — NH — NH_2$ y la semicarbazida $NH_2 — CO — NH — NH_2$, dan lugar a reacciones análogas.

En general, todos los cuerpos así obtenidos tienen forma cristalizada. La determinación del punto de fusión permite definir con certidumbre el aldehído o la cetona de que se derivan.

Preparación de los aldehídos y cetonas. — a) *Deshidrogenación de los alcoholes.* La deshidrogenación de los alcoholes primarios, que da lugar a los aldehídos, y la de los alcoholes secundarios, que conduce a las cetonas, pueden efectuarse por vía **química** o por vía **catalítica.**

La oxidación *química* de los alcoholes se realiza mediante una mezcla de bicromato potásico y ácido sulfúrico (mezcla sulfocrómica).

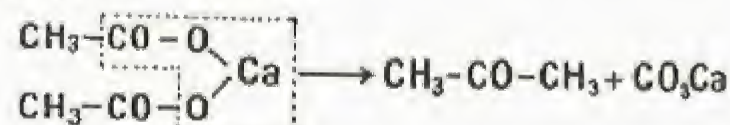
Los aldehídos formados que podrían oxidarse espontáneamente en ácidos se eliminan de la reacción gracias a su volatilidad, que es superior a la de los alcoholes.

Los alcoholes se pueden deshidrogenar *catalíticamente,* haciéndolos pasar en estado de vapor a través de una columna de cobre finamente dividido, a una temperatura comprendida entre 200 a 300° C.

b) *Descomposición de las sales cálcicas de los ácidos orgánicos:*

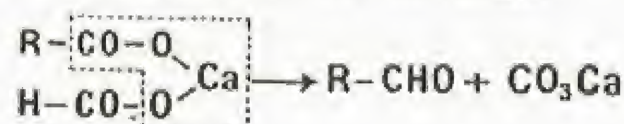
1° Cuando se calienta la sal cálcica de un ácido orgánico, se descompone en una **cetona,** con formación de carbonato cálcico.

El acetato cálcico $(CH_3 — COO)_2Ca$ se transforma así en acetona, que se recupera por destilación:



La reacción es general, y permite obtener las **cetonas sencillas;**

2° Los **aldehídos** pueden ser preparados por este método, empleando una mezcla de sal $(R — COO)_2Ca$ y formiato $(H — COO)_2Ca$ cálcicos. Se puede admitir la existencia de una sal mixta.

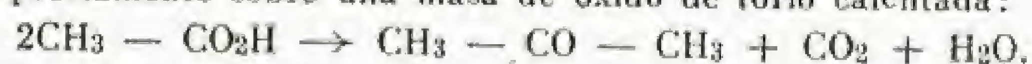


Variante. Se obtienen los mismos resultados si se reemplazan las sales de calcio por los **ácidos** correspondientes, cuyos vapores deben pasar previamente sobre una masa de óxido de torio calentada:

$$2CH_3 — CO_2H \rightarrow CH_3 — CO — CH_3 + CO_2 + H_2O.$$

Observación. — La descomposición de una sal *sódica* R — COO — Na en presencia de un exceso de hidróxido sódico da lugar a un hidrocarburo saturado (R — H) [v. p. 318].

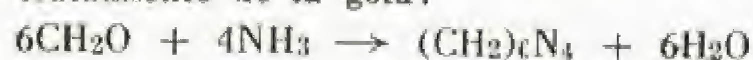
c) *Reacciones organometálicas.* Ya hemos visto anteriormente que las **cetonas** se forman por reacción de las **sales de alcohilmagnesio** con los **nitrilos** (v. p. 322), y de los **compuestos de cincalcohilo** con los cloruros de ácido (v. p. 322). Recordemos esta última reacción:



Aldehídos. Propiedades físicas. Principales términos. — Excepto el primer término, que es gaseoso a la temperatura ordinaria, los aldehídos son líquidos y hierven a temperaturas inferiores a las de los alcoholes correspondientes; son sólidos a partir del término 13. Los primeros términos tienen olor sofocante y son solubles en agua; los términos superiores tienen olor a grasa rancia y son poco solubles.

El *aldehído fórmico* o *metílico* (formaldehído, metanal), HCHO, es un gas licuable (punto de ebullición — 21° C). Se transforma fácilmente en un polímero sólido, el *trioximetileno* $(CH_2O)_3$. Se emplea generalmente en solución acuosa de 40% (formol).

El formol se obtiene industrialmente por oxidación catalítica del alcohol mediante aire. Posee olor picante y goza de propiedades antisépticas. Por reacción con el amoníaco, origina el compuesto *hexametilentetramina* o *urotropina,* utilizado como antiséptico de las vías urinarias y para el tratamiento de la gota:



$$6CH_2O + 4NH_3 \rightarrow (CH_2)_6N_4 + 6H_2O$$

El formol se emplea industrialmente para la preparación de plásticos (*galalita, bakelita,* etc.) y de ciertos colorantes.

El *aldehído acético* o *etílico* (acetaldehído, aldehído ordinario, etanal), $CH_3 — CHO$, es un líquido de olor picante que hierve a 21° C. Da dos polímeros: el *paraldehído,* líquido, que regenera el monómero por destilación en presencia de ácido sulfúrico, y el *metaldehído,* sólido, utilizado en forma de tabletas como combustible en los hornillos portátiles.

El acetaldehído se recupera entre los productos de cabeza de la destilación del alcohol industrial, que contiene siempre cierta proporción de aquél. Se obtiene industrialmente por síntesis, hidratando el acetileno.

El *cloral* o tricloroaldehído, $CCl_3 — CHO$, se obtiene simplemente por acción del cloro sobre el alcohol (la cloruración va acompañada por una oxidación). Es un líquido aceitoso, que hierve a 97° C. El cloral fija una molécula de agua y se transforma en *hidrato de cloral* $CCl_3 — C\begin{smallmatrix}/OH \\ \backslash OH\end{smallmatrix}$, sólido cristalizado que funde a 56° C; este cuerpo constituye un caso típico de hidrato de aldehído estable. Se utiliza como hipnótico y en la preparación del D.D.T.

Cetonas. Propiedades físicas. Principales términos. — Las cetonas alifáticas se presentan en forma líquida (hasta el término 11); su olor es agradable, y son poco solubles en el agua, excepto los primeros términos. Hierven a temperatura más baja que los alcoholes secundarios correspondientes. Algunas de estas cetonas se encuentran en ciertos vegetales.

La *acetona,* $CH_3 — CO — CH_3$, se prepara industrialmente por destilación seca del acetato cálcico. Es un líquido móvil, miscible en el agua, que hierve a 56,5° C. Se utiliza como disolvente y como materia prima para la preparación del cloroformo y del sulfonal.

Derivados trihalogenados

Vamos a estudiar solamente los derivados del ácido fórmico.

Cloroformo. — El cloroformo $H — C\begin{smallmatrix}/Cl \\ —Cl \\ \backslash Cl\end{smallmatrix}$, o triclorometano, se obtiene tratando la *acetona* con el *hipoclorito cálcico.*

La reacción ocurre en dos fases: en la primera se forma **tricloroacetona,** que se hidroliza (segunda fase) y origina ácido acético y cloroformo:



El cloroformo es un líquido incoloro, de densidad 1,51, que hierve a 61° C. Tiene sabor azucarado. Son bien conocidas sus propiedades como anestésico.

En caliente, los álcalis lo transforman en ácido fórmico

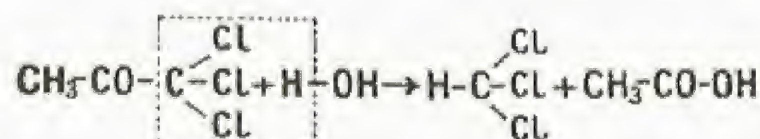
$$H — C\,Cl_3 + 3KOH \rightarrow H — COOH + H_2O + 3ClK.$$

Ya hemos visto (v. p. 325) que las *aminas primarias* dan lugar a las carbilaminas en presencia de hidróxido sódico.

El **bromoformo,** $H — CBr_3$, y el **yodoformo,** $H — CI_3$, son los derivados bromado y yodado que corresponden al cloroformo.

Ácidos y derivados

Generalidades. — Los *ácidos alifáticos saturados,* denominados también *ácidos grasos,* son unos compuestos de fórmula general $R — \overset{/\!/O}{C} — OH$ (equivalente a R — CO — OH, o R — COOH, o $R — CO_2H$) que se caracterizan por el grupo funcional — CO_2H, llamado **carboxilo.**







Obsérvese que la función ácido y las funciones derivadas deben estar situadas obligatoriamente en el extremo de la cadena, puesto que el carbono funcional es necesariamente primario.

La oxidación de los alcoholes primarios da lugar a la formación de ácidos, a través de los aldehídos como productos intermedios. Además, los ácidos se forman en numerosas reacciones oxidantes que van acompañadas por la ruptura de la cadena.

Se encuentran con profusión en la naturaleza, principalmente en forma de ésteres. Los ésteres formados con la glicerina constituyen las grasas y los aceites animales y vegetales.

La **nomenclatura de Ginebra** los designa con un nombre que se deriva de la denominación del hidrocarburo correspondiente. La función se caracteriza por la desinencia **oico.**

El compuesto $CH_3 — COOH$, que corresponde al etano, se llama *ácido etanoico.*

Los ácidos naturales se designan corrientemente con nombres particulares: *ácidos fórmico, acético, propiónico,* etc.

Preparación. — Los ácidos se pueden preparar por diversos métodos.

a) *Saponificación de los* **ésteres naturales.** La hidrólisis de los ésteres de la glicerina permite la separación de los ácidos grasos que se hallan combinados.

Obsérvese que sólo los ácidos con número impar de átomos de carbono son capaces de formar glicéridos.

b) *Oxidación de los* **alcoholes primarios.** Esta operación se efectúa generalmente mediante la mezcla crómica



$$R — CH_2OH + O_2 \rightarrow R — COOH + H_2O.$$

c) *Síntesis a partir de los* **halogenuros de alcohilo.** Hay dos métodos que permiten pasar del halogenuro de alcohilo R — X (y por lo tanto del alcohol) al ácido R — COO — H cuya cadena contiene un átomo de carbono suplementario:

1º Se transforma el derivado R — X en **nitrilo** R — C ≡ N por acción del *cianuro potásico*:



$$R-\boxed{X+K}-C \equiv N \rightarrow R-C \equiv N + KX$$

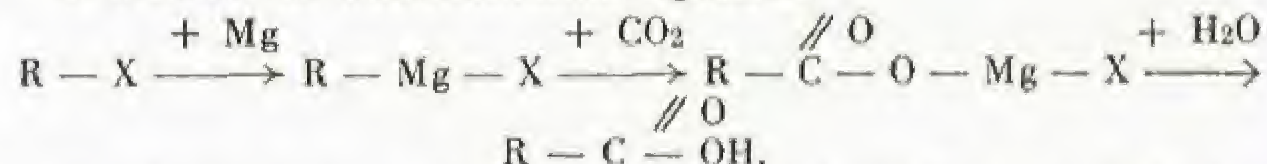
El nitrilo se saponifica con facilidad y conduce a la sal amónica del ácido



$$R — C \equiv N + 2H_2O \rightarrow R — COONH_4;$$

2º El derivado halogenado R — X se transforma en la *sal de alcohilmagnesio correspondiente,* R — Mg — X, y ésta reacciona con el anhídrido carbónico CO_2 (v. p. 322).

Se efectúan las transformaciones siguientes:



$$R — X \xrightarrow{+ Mg} R — Mg — X \xrightarrow{+ CO_2} R — C(//O) — O — Mg — X \xrightarrow{+ H_2O} R — C(//O) — OH.$$

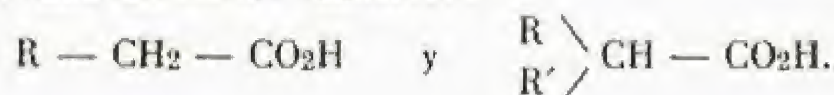
d) *Síntesis a partir de los* **ácidos malónicos.** El ácido **malónico** (v. p. 330) es el diácido de fórmula $CO_2H — CH_2 — CO_2H$.

Los ácidos disubstituidos se preparan fácilmente:



$$CO_2H — CH(R) — CO_2H \quad y \quad CO_2H — C(R)(R') — CO_2H;$$

se descomponen ulteriormente, perdiendo una molécula de anhídrido carbónico, y dan los ácidos sintéticos:



$$R — CH_2 — CO_2H \quad y \quad {R \atop R'}\!\!>CH — CO_2H.$$

Propiedades físicas. — Los primeros términos de los ácidos son líquidos; los términos elevados son sólidos a los que corresponden puntos de fusión bajos. Los ácidos fórmico y acético se mezclan bien con el agua. La solubilidad disminuye rápidamente a medida que aumenta el número de carbonos de la cadena.

En general, los primeros términos tienen olor picante, que se atenúa al pasar a los términos más elevados.

Propiedades químicas. — a) *Acidez.* Los ácidos orgánicos están poco disociados en sus iones; por lo tanto, su acidez es débil. El ácido fórmico es el más fuerte de todos ellos.

Reaccionan con las bases, dando sales metálicas



$$R-CO-O\boxed{H+H-O}-Na \rightarrow R-CO-ONa + H_2O$$

y descomponen los carbonatos alcalinos, de los que expulsan el anhídrido carbónico. Al igual que los ácidos inorgánicos, dan cloruros de ácidos y de ésteres.

b) *Acción de los halógenos.* La presencia del carboxilo — CO_2H favorece la substitución por el cloro y el bromo de los átomos de hidrógeno contenidos en el carbono vecino de la función.

Se puede clorar el ácido acético de acuerdo con la reacción:



$$CH_3 — CO_2H + Cl_2 \rightarrow CH_2Cl — CO_2H + HCl.$$

El ácido *cloroacético* formado puede clorarse aún y dar lugar a los ácidos *dicloroacético,* $CHCl_2 — CO_2H$, y tricloroacético, $CCl_3 — CO_2H$.

c) *Transición a los derivados.* La función ácido permite pasar a los *cloruros de ácido, amidas* y *nitrilos.* Inversamente, estos cuerpos pueden regenerar los ácidos.

Describiremos estas reacciones cuando estudiemos cada función particular.

d) *Reducción.* Ya hemos visto que los ácidos pueden reducirse a los *alcoholes primarios* correspondientes, mediante hidrogenación a presión.

En la práctica, esta operación se realiza con los ésteres en vez de con los ácidos.

e) *Degradación.* Recordemos que las *sales sódicas* de los ácidos, R — CO_2Na, conducen a la formación de los hidrocarburos saturados R — H por acción del hidróxido sódico, y a los hidrocarburos saturados R — R por hidrólisis (v. p. 318).

Ya hemos hablado en el capítulo precedente (v. p. 606) de la descomposición de las sales de calcio, que permite obtener las *cetonas* y los *aldehídos.*

Principales términos. — El *ácido fórmico (metanoico),* H — CO_2H, se encuentra en forma libre en la ortiga, en las hormigas y en las orugas procesionarias. Se preparaba antaño por descomposición del ácido *oxálico* (v. p. 330), y actualmente se realiza la síntesis del *formiato sódico,* HCO_2Na, provocando a 200º C la reacción del óxido de carbono CO con la sosa cáustica o, lo que es aún mejor, con la cal sodada



$$NaOH + CO \rightarrow H — CO_2Na.$$

(El ácido fórmico se obtiene fácilmente a partir de esta sal, pues es desplazado por cualquier ácido mineral.)

El ácido anhidro hierve a 118º C. Es cáustico y vesicante. Se mezcla bien con el agua. El ácido sulfúrico lo deshidrata, provocando la liberación de óxido de carbono



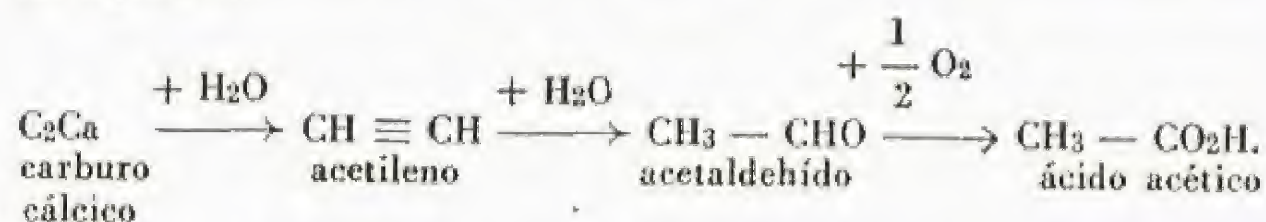
$$H — CO_2H \rightarrow CO + H_2O.$$

En general, los formiatos son solubles en el agua. El formiato sódico pierde hidrógeno cuando se calienta a 400º C aproximadamente, y se transforma en oxalato



$$2HCO_2Na \rightarrow Na — CO_2 — CO_2 — Na + H_2.$$

El *ácido acético (etanoico),* $CH_3 — CO_2H$, se forma en la oxidación biológica del alcohol etílico por efecto del *micoderma aceti* (preparación del vinagre). Se encuentra en los alquitranes procedentes de la destilación de la madera, de donde se extrae industrialmente. Se puede obtener por síntesis a partir del acetileno. Las transformaciones son las siguientes:



$$\underset{\text{carburo cálcico}}{C_2Ca} \xrightarrow{+ H_2O} \underset{\text{acetileno}}{CH \equiv CH} \xrightarrow{+ H_2O} \underset{\text{acetaldehído}}{CH_3 — CHO} \xrightarrow{+ \frac{1}{2} O_2} \underset{\text{ácido acético}}{CH_3 — CO_2H.}$$

El ácido anhidro funde a 16,7º C y hierve a 118º C. Tiene olor penetrante y se mezcla bien con el agua. Aparte de su utilización en la industria alimenticia, sirve para la fabricación de los ésteres celulósicos, el *verdete* (cardenillo, acetato de cobre), la acetona, etc.

Los términos superiores llevan los nombres de ácidos *propiónico* (3 carbonos), *butírico* (4 carbonos) y *valeriánico* (5 carbonos). El ácido *butírico* está presente en la mantequilla, en forma de glicérido, y se forma en ciertas fermentaciones. Los ácidos *caprónico, caprílico* y *caprínico* de cadena normal (con 6, 8 y 10 carbonos, respectivamente) se encuentran en la manteca de vaca y de cabra.

Los ácidos *palmítico,* $CH_3 — (CH_2)_{14} — CO_2H$, y *esteárico,* $CH_3 — (CH_2)_{16} — CO_2H$, se retiran del sebo (v. GRASAS, p. 357) para la fabricación de velas, así como el ácido *oleico,* $C_{18}H_{34}O_2$, cuya cadena contiene un doble enlace. Las sales alcalinas de estos ácidos constituyen los jabones.

Ésteres de los ácidos grasos saturados

Generalidades. — Los ésteres de los ácidos grasos tienen por fórmula general R — C(//O) — O — R'. Se forman por eliminación de agua en la reacción de un ácido R — CO_2H con un alcohol R' — OH. La **nomenclatura** los considera como *sales de alcohilo: acetato (etanoato)* de metilo, $CH_3 — CO — O — CH_3$, *formiato (metanoato)* de propilo, H — CO — O — C_3H_7, etc.

Estos cuerpos son líquidos, poco solubles en el agua, generalmente de olor agradable (aceites esenciales). Algunos de ellos se utilizan en perfumería y en la industria de la alimentación.

Preparación. — Hay que distinguir los métodos de esterificación **directa** y de esterificación **indirecta.**

a) *Esterificación directa.* Ya hemos visto anteriormente que la reacción equimolecular de un ácido con un alcohol es limitada por la reacción inversa. El rendimiento de la reacción es mayor si se emplea un exceso de alcohol y si, además, se utilizan deshidratantes tales como el ácido sulfúrico concentrado, el ácido clorhídrico gaseoso seco, etc.

La esterificación de los alcoholes primarios es más fácil de lograr que la de los alcoholes secundarios, y sobre todo que la de los alcoholes terciarios;

b) *Esterificación indirecta.*

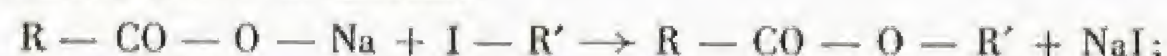
1º Los **cloruros de ácido** reaccionan cuantitativamente con los **alcoholes,** dando los ésteres correspondientes y liberando ácido clorhídrico:



$$R-CO-\boxed{Cl+H}-O-R' \rightarrow R-CO-O-R' + HCl$$

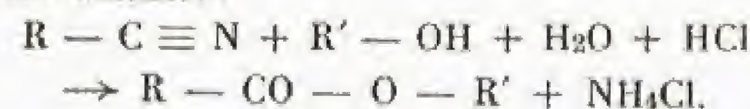
Este método presenta en ciertos casos ventaja sobre el de la esterificación directa;

2º Las **sales alcalinas** o **de plata** de los ácidos grasos reaccionan con los **halogenuros de alcohilo:**



$$R — CO — O — Na + I — R' \rightarrow R — CO — O — R' + NaI;$$

3º Los **nitrilos** pueden dar directamente el éster del ácido por acción del alcohol en presencia de cloruro de hidrógeno; en esta reacción se precipita cloruro amónico:



$$R — C \equiv N + R' — OH + H_2O + HCl \rightarrow R — CO — O — R' + NH_4Cl.$$

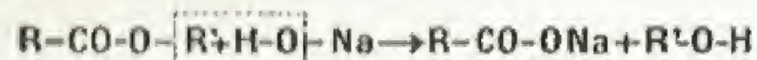
Propiedades químicas. — En las reacciones de los ésteres, la cadena se rompe siempre en un enlace sencillo, ya entre el oxígeno y el alcohilo R', ya entre el oxígeno y el grupo R — CO —, de manera que se elimina alcohol o uno de sus derivados (R'I, R' — O — Mg — X, etc).

a) *Hidrólisis o saponificación.* La saponificación de los ésteres, llamada así por analogía con la formación de *jabones* a partir de las grasas (v. p. 329), es la reacción inversa de la esterificación:



$$R-CO-O-\boxed{R'+HO}-H \rightarrow R-CO-OH + R'-O-H$$

El rendimiento de la reacción es limitado cuando la saponificación se realiza con agua, y, en cambio, puede llegar a ser total por adición de un ácido mineral o de un álcali. En este caso, el ácido pasa a la forma de sal alcalina:



$$R-CO-O-\boxed{R'+H-O}-Na \longrightarrow R-CO-ONa+R'-O-H$$

El ácido se obtiene fácilmente a partir de esta sal, por reacción con ácido clorhídrico (método general de preparación de los ácidos a partir de sus sales).

b) *Desdoblamiento por los hidrácidos.* Los ácidos bromhídrico y yodhídrico desdoblan los ésteres con formación de bromuro o de yoduro de alcohilo:



$$R-CO-O-\boxed{R'+I}-H \longrightarrow R-CO-O-H+R'I$$

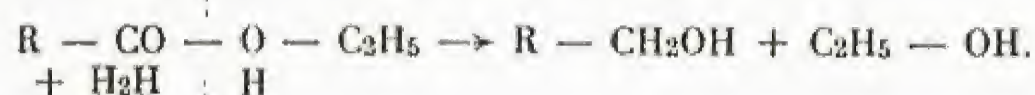
c) *Acción del amoniaco.* El amoniaco, NH_3 da lugar a la amida y pone en libertad alcohol:



$$R-CO-\boxed{O-R'+H}-NH_2 \rightarrow R-CO-NH_2+R'-O-H$$

d) *Hidrogenación.* Los ésteres se hidrogenan con mayor facilidad que los ácidos. Generalmente, se emplea el éster etílico, al que se trata con una mezcla hidrogenante (sodio y alcohol).

En estas condiciones, se obtiene el alcohol primario correspondiente al ácido, formándose al mismo tiempo alcohol etílico:



$$\begin{array}{l} R - CO - O - C_2H_5 \rightarrow R - CH_2OH + C_2H_5 - OH. \\ + H_2H \quad H \end{array}$$

e) *Acción de las sales de alcohilmagnesio.* Se obtiene un alcohol terciario (v. p. 322).

f) *Reacciones de condensación.* Los ésteres se condensan entre sí en presencia de sodio, y dan igualmente productos de condensación con las cetonas.

Principales términos. — El *acetato de etilo* o *éster acético*



$$CH_3 - CO_2 - C_2H_5$$

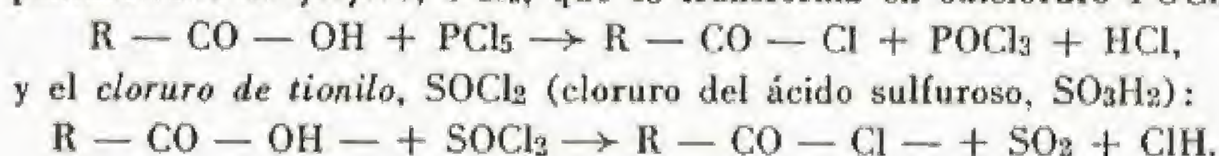
es un líquido que hierve a 77° C. Se emplea para la fabricación del éster acetilacético y como disolvente de los barnices celulósicos. El *acetato de amilo* tiene olor a plátano (bombones). El *butirato de etilo* constituye la esencia artificial de ananá (piña).

Cloruros de ácido

Nomenclatura. — Los cloruros de ácido, de fórmula general $R - \overset{/\!/ O}{C} - Cl$ o $R - COCl$, pueden ser considerados como derivados de los radicales monovalentes $R - CO -$ que llevan el nombre de **acidilos;** por ejemplo, cloruros de *acetilo* $CH_3 - CO - Cl$, de *propionilo*, $C_2H_5 - CO - Cl$, etc. (de etanoilo, de propanoilo, etc., según la nomenclatura de Ginebra).

No se ha logrado aislar hasta la fecha el cloruro correspondiente al ácido fórmico.

Preparación. — Los cloruros de ácido se preparan por reacción de los **agentes clorurantes** con los ácidos. Los más empleados son el *pentacloruro de fósforo*, PCl_5, que se transforma en oxicloruro $POCl_3$:



$$R - CO - OH + PCl_5 \rightarrow R - CO - Cl + POCl_3 + HCl,$$

y el *cloruro de tionilo*, $SOCl_2$ (cloruro del ácido sulfuroso, SO_3H_2):

$$R - CO - OH - + SOCl_2 \rightarrow R - CO - Cl - + SO_2 + ClH.$$

Propiedades físicas. — Los cloruros de ácido son líquidos, de olor sofocante; humean al aire y hierven a temperatura más baja que los ácidos correspondientes.

Propiedades químicas. — Se descomponen inmediatamente por acción del agua, regenerando el ácido graso y desprendiendo ácido clorhídrico



$$R-CO-\boxed{Cl+H}-OH \longrightarrow R-CO-OH+HCl$$

Prácticamente, dan lugar a las mismas reacciones que los ácidos. En estas reacciones se pone en libertad el hidrácido en vez de agua. En general, los cloruros poseen mayor tendencia a la reacción que los ácidos.

a) Los *alcoholes* se transforman en ésteres:



$$R-CO-\boxed{Cl+H}-O-R' \longrightarrow R-CO-O-R'+HCl$$

b) La reacción con el *amoniaco* da directamente las *amidas:*



$$R - CO - Cl + NH_3 \rightarrow R - CO - NH_2 + ClH.$$

Las *aminas* primarias y secundarias dan amidas alcohiladas. En cambio, las aminas terciarias no reaccionan con los cloruros de ácido.

c) Las *sales sódicas* de los ácidos dan lugar a la formación de los *anhídridos* (v. capítulo siguiente).

d) *Reacciones diversas.* Recordemos que los cloruros de ácido reaccionan con las sales de alcohilmagnesio y de cincalcohilo.

Por acción del hidrógeno, se pueden reducir a alcoholes primarios:



$$R - CO - Cl + 2H_2 \rightarrow R - CH_2OH + ClH.$$

Anhídridos de ácido

Generalidades. — Los *anhídridos de ácido*, cuya fórmula general es $R - CO - O - CO - R$, se forman teóricamente por eliminación de una molécula de agua entre dos moléculas de ácido. Se preparan por reacción de la sal sódica de un ácido con el cloruro correspondiente:



$$R-CO-O\boxed{Na+Cl}-CO-R \longrightarrow R-CO-O-CO-R+NaCl$$

Se presentan en estado líquido y sólido. Reaccionan como los cloruros de ácido, liberando siempre una molécula de ácido graso en vez de ácido clorhídrico.

Su empleo es más limitado que el de los cloruros.

Amidas

Preparación. — Las *amidas* responden a la fórmula general $R - \overset{/\!/ O}{C} - NH_2$. Se preparan *deshidratando* las *sales amónicas* de los ácidos grasos:



$$R - CO - O - NH_4 \rightarrow R - CO - NH_2 + H_2O.$$

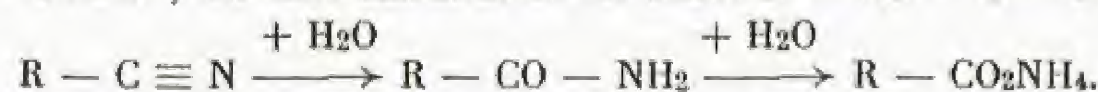
Se forman igualmente en la reacción de los cloruros de ácido con el amoniaco (v. antes) y en la hidratación de los nitrilos (v. más adelante).

Son denominadas en función del ácido del que se derivan: *formamida* $H - CO - NH_2$, *acetamida* $CH_3 - CO - NH_2$, etc.

Propiedades físicas. — Las amidas se presentan en forma sólida cristalizada; la determinación de su punto de fusión puede servir para **caracterizar los ácidos** de que se derivan.

Son solubles en el alcohol y en el éter; en cambio, sólo los primeros términos de la serie son solubles en el agua.

Propiedades químicas. — a) *Hidratación y deshidratación.* Las amidas constituyen el término intermedio de hidratación entre los nitrilos $R - C \equiv N$ y las sales amónicas de los ácidos $R - CO - O - NH_4$:



$$R - C \equiv N \xrightarrow{+ H_2O} R - CO - NH_2 \xrightarrow{+ H_2O} R - CO_2NH_4.$$

Se hidratan por acción de los ácidos minerales o de los álcalis diluidos y se transforman en ácidos grasos. En cambio, los deshidratantes conducen a la formación de nitrilos.

b) *Carácter anfótero.* Las amidas son a la vez bases y ácidos muy débiles; así, forman sales muy hidrolizables con el ácido clorhídrico, y por otra parte pueden engendrar derivados sódicos tales como



$$R - CO - NH - Na.$$

Esta propiedad, que manifiestan ciertos cuerpos, de poder formar en distintas condiciones el catión o el anión de una sal constituye el carácter anfótero de dichos cuerpos.

c) *Degradación.* Por acción del *hipoclorito* o del *hipobromito* de sodio, las *amidas* $R - CO - NH_2$ se transforman en **aminas** $R - NH_2$; el átomo de carbono de la amida se elimina en forma de anhídrido carbónico.

Esta reacción de oxidación se efectúa según un proceso particular, en cuyo detalle no podemos entrar aquí.

Nitrilos

Nomenclatura. — Los nitrilos, de fórmula general $R - C \equiv N$, se denominan corrientemente de acuerdo con el nombre del ácido correspondiente. Por ejemplo, se dirá *acetonitrilo*, *propionitrilo* (*etanonitrilo*, *propanonitrilo*, según la nomenclatura de Ginebra), etc. El nitrilo *fórmico* es sencillamente el *ácido cianhídrico* $H - C \equiv N$.

A menudo, los nitrilos reciben el nombre de *cianuros de alcohilo*. Así, el acetonitrilo o etanonitrilo $CH_3 - C \equiv N$ se llama *cianuro de metilo*. Estas denominaciones destruyen la armonía de la nomenclatura.

Preparación. — En general, los nitrilos se preparan con miras a la obtención ulterior de los ácidos corespondientes. Ya hemos descrito en la página 607 un procedimiento que permite obtenerlos por síntesis. Se preparan también a partir del *éster cianacético* (v. p. 330). Además, se forman por deshidratación de las amidas y de las sales amónicas de los ácidos grasos.

Propiedades físicas. — Se presentan en estado líquido. Poseen olor etéreo. Sólo los primeros términos de la serie son solubles en el agua. Son *tóxicos*, aunque mucho menos que el ácido cianhídrico.

Propiedades químicas. — La existencia del triple enlace $C \equiv N$ confiere a estos compuestos una gran tendencia a las reacciones de **adición:** *hidratación* (v. AMIDAS, p. 328), acción sobre las sales de alcohilmagnesio (v. p. 322). La fijación de cuatro átomos de hidrógeno da lugar a la formación de las aminas primarias $R - CH_2 - NH_2$.

Principales términos. — El *ácido cianhídrico* (vulgarmente llamado *ácido prúsico*), $H - C \equiv N$, se encuentra en las almendras amargas. Berthelot realizó su síntesis haciendo saltar una chispa eléctrica en el seno de una mezcla de acetileno y nitrógeno. Generalmente, se prepara por acción de los ácidos diluidos sobre los cianuros o ferrocianuros alcalinos. Es extraordinariamente tóxico.

En forma anhidra, constituye un líquido que se solidifica a —15° C y hierve a 26,5° C. Posee un olor muy pronunciado a almendras amar-

gas. Es un ácido débil. Sus sales se hidrolizan fuertemente, y son descompuestas por el ácido carbónico. Forma sales complejas, tales como los ferrocianuros, etc. (V. QUÍMICA GENERAL, p. 237.)

El *acetonitrilo*, $CH_3 - C \equiv N$, es un líquido que hierve a 81° C. Se obtiene por deshidratación de la acetamida.

Grupo del anhídrido carbónico

Ácidos y ésteres carbónicos. — El *ácido carbónico*, $O = C\begin{smallmatrix}\diagdown OH \\ \diagup OH\end{smallmatrix}$, es inestable en forma libre; sin embargo, sus sales inorgánicas, ácidas o neutras, son estables. Se pueden preparar por esterificación indirecta los diésteres del tipo $O = C\begin{smallmatrix}\diagup O - R \\ \diagdown O - R\end{smallmatrix}$ y los ésteres-ácidos que no pueden ser aislados sino en forma de sales alcalinas: $O = C\begin{smallmatrix}\diagup O - Na \\ \diagdown O - R\end{smallmatrix}$.

Derivados clorados. — El *dicloruro* del ácido carbónico, $O = C\begin{smallmatrix}\diagup Cl \\ \diagdown Cl\end{smallmatrix}$, es conocido con el nombre de **oxicloruro de carbono** o **fosgeno.** Se obtiene por unión directa del óxido de carbono y el cloro, en presencia de carbón de madera. Es un gas muy tóxico.

El *monocloruro de ácido*, $O = C\begin{smallmatrix}\diagup OH \\ \diagdown Cl\end{smallmatrix}$, *ácido clorocarbónico* o *clorofórmico*, no existe en forma libre; sin embargo, se conoce en forma de éster: $O = C\begin{smallmatrix}\diagup O - R \\ \diagdown Cl\end{smallmatrix}$.

El *tetracloruro de carbono*, CCl_4, se obtiene por diversos métodos; uno de los más conocidos es el que resulta de la acción del cloruro de azufre sobre el sulfuro de carbono, en presencia de hierro:



$$CS_2 + 2S_2Cl_2 \rightarrow CCl_4 + 6S.$$

Es un líquido de densidad 1,63, que hierve a 77° C. Se emplea como disolvente y en los extintores de incendios.

Derivados nitrogenados. — a) *Urea.* La urea es la diamida carbónica, $O = C\begin{smallmatrix}\diagup NH_2 \\ \diagdown NH_2\end{smallmatrix}$, contenida en la orina. Es un sólido blanco que se transforma en carbonato amónico por hidratación.

Posee numerosos derivados. Se puede combinar con los ácidos grasos y dar las amidas substituidas denominadas *ureidos*, algunos de los cuales poseen una cadena cerrada, tales como la *oxalilurea* o *ácido parabánico* $O = C\begin{smallmatrix}\diagup NH - C = O \\ | \\ \diagdown NH - C = O\end{smallmatrix}$, que se forma en la condensación del ácido oxálico con la urea. El *ácido úrico*, la *xantina*, la *cafeína* y la *guanina* son otros ureidos más complejos.

b) *Ácido carbámico.* La monoamida carbónica $O = C\begin{smallmatrix}\diagup OH \\ \diagdown NH_2\end{smallmatrix}$ es el *ácido carbámico*, que se encuentra en proporción elevada en forma de sal amónica $O = C\begin{smallmatrix}\diagup ONH_4 \\ \diagdown NH_2\end{smallmatrix}$ acompañando al carbonato amónico ordinario.

El ácido carbámico es estable en forma de ésteres $O = C\begin{smallmatrix}\diagup OR \\ \diagdown NH_2\end{smallmatrix}$

Estos cuerpos reciben el nombre de *uretanos*.

c) *Ácidos isociánico* $O = C = NH$ y *ciánico* $N \equiv C - OH$. El ácido isociánico se obtiene en forma de sal alcalina al oxidarse los cianuros y los ferrocianuros. Es un líquido estable por debajo de 0° C, que se polimeriza a la temperatura ordinaria. Se conocen sus ésteres, de fórmula general $O = C = N - R$.

La síntesis de la urea ha sido realizada por Woehler, isomerizando el isocianato amónico $O = C = N - NH_4$.

d) *Cianamida.* La cianamida, $N \equiv C - NH_2$, es el nitrilo del ácido carbámico. El derivado cálcico sirve como abono, por lo que se prepara industrialmente por reacción del nitrógeno con el carburo cálcico.

Derivados sulfurados. — El *sulfuro de carbono*, CS_2, se forma en la acción directa del azufre en vapor sobre el carbón. Es un líquido muy inflamable, que hierve a 46° C. Se utiliza como disolvente.

El *ácido sulfociánico* o *tiociánico*, también llamado rodánico y rodanhídrico, $N \equiv C - S - H$, es estable sobre todo en forma de sales, que se forman por fusión de los cianuros con azufre. Las soluciones de estas sales se colorean de rojo intenso en presencia de iones férricos, por lo que sirven para el reconocimiento de estos cationes.

Los ésteres del *ácido isosulfociánico* o *tiociánico*, $S = C = N - H$, tienen olor picante. Se conocen con el nombre de *senevoles*. La mostaza debe su aroma al isotiocianato de alilo:



$$S = C = N - CH_2 - CH = CH_2.$$

El *ácido libre* se encuentra en la cebolla.

La *tiourea* $S = C\begin{smallmatrix}\diagup NH_2 \\ \diagdown NH_2\end{smallmatrix}$ se origina por isomerización del tiocianato amónico.

Cuerpos con funciones múltiples

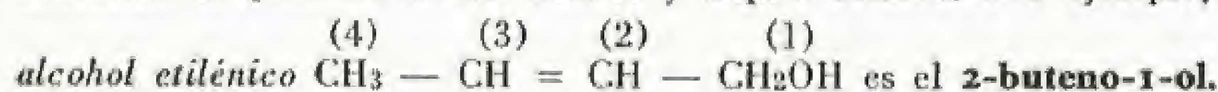
Generalidades. — En los cuerpos que poseen varias funciones o cuerpos de funciones múltiples, las diversas funciones conservan las propiedades que les son peculiares. Sin embargo, se observa a menudo que su comportamiento global manifiesta variaciones, lo que es debido precisamente a la influencia que las funciones ejercen unas sobre otras.

Para su nomenclatura, se *numeran* correlativamente los carbonos de la cadena, empezando por uno de los extremos, lo que permite situar la *posición* de las diversas funciones. Así, el ácido-alcohol



$$\overset{(4)}{CH_3} - \overset{(3)}{CHOH} - \overset{(2)}{CH_2} - \overset{(1)}{CO_2 H},$$

derivado del ácido butírico, se denominará **ácido 3-hidroxibutírico** o **3-butanol-oico.** Procediendo de esta manera, se determina también sin dificultad la posición de los dobles y triples enlaces. Por ejemplo, el



alcohol etilénico $\overset{(4)}{CH_3} - \overset{(3)}{CH} = \overset{(2)}{CH} - \overset{(1)}{CH_2OH}$ es el **2-buteno-1-ol.**

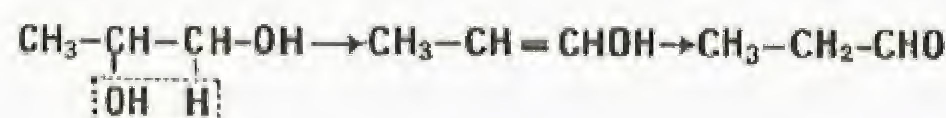
Las posiciones relativas de dos funciones en una misma cadena se ponen de manifiesto por las letras griegas α, β, γ, δ, ϵ, etc., según que sean adyacentes o estén separadas por 1, 2, 3, 4, etc., átomos de carbono. El *3-butanol-oico* es un ácido-alcohol β; el *4-butanol-oico* $CH_2OH - CH_2 - CH_2 - CO_2H$, un ácido-alcohol γ. Vamos a estudiar a continuación las funciones complejas más importantes.

Polialcoholes

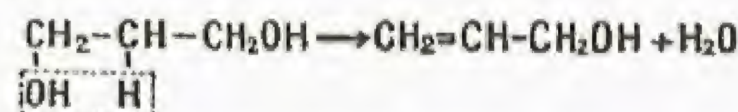
Dialcoholes, dioles o glicoles. — Los dialcoholes se denominan corrientemente glicoles, debido al nombre del representante más sencillo del grupo. Todos estos alcoholes divalentes son líquidos de consistencia siruposa y de sabor dulce. Los primeros términos son solubles en el agua.

Las reacciones de **deshidratación** permiten diferenciar los glicoles α, β, γ, etc.

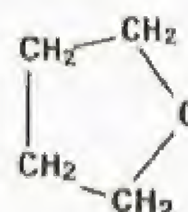
Los glicoles α conducen a la formación de **aldehídos** o **cetonas** a través de la fórmula enólica:



Los *glicoles* β dan **alcoholes etilénicos**

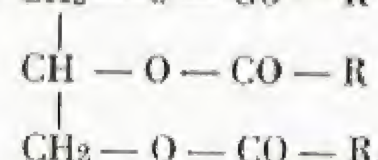


Los *glicoles* γ y δ se deshidratan en ésteres internos, que forman ciclos de cinco o seis eslabones, tales como el ciclo pentagonal:



El *glicol ordinario*, o *etanodiol*, $CH_2OH - CH_2OH$, se obtiene fácilmente a partir del etileno. Tiene sabor dulce y sirve como sucedáneo de la glicerina. Su dinitrato es empleado como explosivo.

Glicerina o glicerol (propanotriol). — La glicerina es el trialcohol de fórmula $CH_2OH - CHOH - CH_2OH$. Se encuentra con gran profusión en la naturaleza en forma de ésteres (glicéridos) constituidos con los ácidos alifáticos. La fórmula general de estos triésteres es



$$\begin{array}{l} CH_2 - O - CO - R \\ | \\ CH - O - CO - R \\ | \\ CH_2 - O - CO - R. \end{array}$$

Estos **cuerpos** son las **grasas** de origen animal (sebo, mantequilla, aceites de pescado, etc.) o vegetal (grasas, aceites vegetales).

Entre los ácidos combinados en estos ésteres se encuentran ácidos *saturados*, sobre todo los ácidos *palmítico*, $C_{16}H_{32}O_2$, y esteárico, $C_{18}H_{36}O_2$, y ácidos etilénicos, dietilénicos, etc. (ácido oleico, $C_{18}H_{34}O_2$).

Hidrólisis de las grasas. — La molécula de las grasas se escinde por hidrólisis en una molécula de glicerina y tres moléculas de ácido graso.

Si se realiza la operación por medio del *ácido sulfúrico*, los ácidos orgánicos, insolubles, se reúnen en la superficie de las aguas glicerinosas, en donde nadan. Se recogen y se prensa la torta así formada; el ácido oleico, líquido, se separa de los ácidos palmítico y esteárico, cuya mezcla sirve para la fabricación de *bujías*.

Si se efectúa la hidrólisis con los *álcalis*, los ácidos dan lugar a las sales alcalinas correspondientes, que constituyen los **jabones.** Los jabones *sódicos* son *duros* y pueden ser separados de las lejías que contienen la glicerina por adición de sal marina. Los jabones *potásicos* son blandos y, contrariamente a los jabones sódicos, contienen la glicerina, que no se ha separado de ellos como en el caso anterior.

La glicerina se extrae de las aguas residuales obtenidas en estas operaciones. Se purifica por destilación a presión reducida. Se puede obtener también en la fermentación de los zumos azucarados. Es un líquido espeso, de sabor dulce, soluble en el agua. Se solidifica por debajo de 17° C.

Con el ácido nítrico, da un triéster



$$\begin{array}{l} CH_2 - O - NO_2 \\ | \\ CH - O - NO_2 \\ | \\ CH_2 - O - NO_2 \end{array}$$

llamado impropiamente **nitroglicerina,** que es un explosivo de gran poder; con este fin, se emplea generalmente en forma de dinamita (tierra de infusorios embebida con nitroglicerina).

La glicerina da fácilmente derivados *alílicos*, tales como el *alcohol alílico*, $CH_2 = CH - CH_2OH$, el *yoduro de alilo*, $CH_2 = CH - CH_2I$, y la *acroleína* (*aldehido acrílico*), $CH_2 = CH - CHO$.

Polialcoholes diversos. — El más sencillo de los alcoholes tetravalentes es la **eritrita,** $CH_2OH - CHOH - CHOH - CH_2OH$, uno de cuyos isómeros se encuentra en forma libre en las algas. Se halla formando ésteres en los líquenes del género Roccella.

Los alcoholes pentavalentes y hexavalentes (*pentitas* y *hexitas*) son solubles en el agua. Contienen siempre átomos de carbono asimétricos, lo que da lugar a numerosos isómeros ópticos.

Las **pentitas** y las **hexitas** se forman en la hidrogenación de los azúcares correspondientes: *pentosas* y *hexosas* (v. cap. siguiente). La **manita,** contenida en el zumo del fruto llamado maná, es una hexita.

Azúcares. Hidratos de carbono

Hexosas. — A los alcoholes hexavalentes o *hexitas* corresponden los *aldehídos* y *cetonas* que poseen cinco funciones **alcohol.** La fórmula general de estos compuestos, llamados **hexosas,** es $C_6H_{12}O_6$. Hay que distinguir las **aldohexosas,** de carácter aldehídico, tales como la *glucosa* y la *galactosa*



$$CH_2OH - (CHOH)_4 - CHO,$$

y las **cetohexosas,** de carácter cetónico, tales como la *fructosa* y la *sorbosa*



$$CH_2OH - (CHOH)_3 - CO - CH_2OH.$$

Todos estos cuerpos poseen numerosos isómeros estereoquímicos.

Estos compuestos reciben el nombre de **azúcares,** debido a su sabor. Pertenecen igualmente al grupo llamado de los **hidratos de carbono,** pues su fórmula bruta es un múltiplo de CH_2O.

Las hexosas pueden ser objeto de fermentaciones (alcohólica, láctica y butírica, principalmente).

Se puede esquematizar la fermentación alcohólica por la ecuación:



$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2C_2H_5OH + CO_2.$$

Se conocen también los azúcares pentavalentes, llamados *pentosas*, que contienen cuatro funciones alcohol y una aldehído.

Polisacáridos. — Hay que distinguir los *polisacáridos parecidos a los azúcares*, de los que los más importantes son los **disacáridos** $C_{12}H_{22}O_{11}$, y los *polisacáridos no parecidos a los azúcares*, de fórmula general $(C_6H_{10}O_5)$.

Los primeros no fermentan directamente, contrariamente a lo que sucede con los **monosacáridos.** Pueden fijar una molécula de agua y desdoblarse en dos moléculas de monosacáridos por acción de los ácidos diluidos en presencia de fermentos diastásicos. Los más conocidos son la *sacarosa* (azúcar de caña y de remolacha), que se desdobla en glucosa y levulosa; la *lactosa* o azúcar de leche, que se desdobla en glucosa y galactosa, y la *maltosa* (v. más adelante), que da dos moléculas de glucosa.

En los segundos, el factor n es desconocido; lo único que se sabe es que tiene un valor muy elevado. Comprenden:

El *almidón*, presente en los granos y en los tubérculos (fécula) de ciertos vegetales, que se puede transformar por influencia de los ácidos diluidos o de las diastasas en *dextrinas* menos condensadas, después en *maltosa* y finalmente en *glucosa*. (Estas reacciones constituyen la base de la fabricación de la cerveza y de los aguardientes de granos o de patata.)

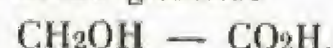
La *celulosa*, parte esencial de las membranas celulares de los vegetales, cuyas funciones alcohol se esterifican con facilidad. Esta propiedad confiere a la celulosa una multitud de aplicaciones: preparación de las *nitrocelulosas* utilizadas como explosivos y como productos de base para la fabricación del celuloide, las *acetocelulosas*, constituyentes de ciertos barnices, y la *viscosa*, que, como la acetocelulosa, sirve para la preparación de la seda artificial.

Existen polisacáridos $(C_5H_8O_4)_n$ correspondientes a las pentosas.

Ácidos alcoholes

Monoácidos-monoalcoholes. — Estos compuestos, llamados también **ácidos monoxicarboxílicos,** son líquidos, viscosos.

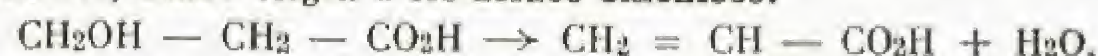
El primer término es el *ácido glicólico*



$$CH_2OH - CO_2H.$$

El homólogo superior es el ácido láctico, $CH_3 - CHOH - CO_2H$. (El átomo de carbono mediano está ligado a cuatro radicales diferentes y es, por consiguiente, asimétrico; por lo tanto, el ácido láctico puede existir en dos formas ópticamente activas. Se prepara por fermentación láctica de los azúcares.)

Al igual que los glicoles β, los **ácidos alcoholes** β se deshidratan fácilmente, dando origen a los **ácidos etilénicos:**



$$CH_2OH - CH_2 - CO_2H \longrightarrow CH_2 = CH - CO_2H + H_2O.$$

Los **ácidos alcoholes** γ y δ dan espontáneamente ésteres internos de olor agradable, constituidos por ciclos de cinco y seis eslabones, llamados **lactonas.**

El 4-butanol-oico conduce a la lactona:



$$\begin{array}{l} CH_2 - CO \diagdown \\ | \qquad\qquad\quad O. \\ CH_2 - CH_2 \diagup \end{array}$$

Poliácidos-polialcoholes. — De estos compuestos, citaremos: El **ácido málico,** $CO_2H - CH_2 - CHOH - CO_2H$, que se encuentra en las manzanas y se emplea en la preparación de purgantes y de productos contra las afecciones de la garganta; el **ácido tartárico,** $CO_2H - CHOH - CHOH - CO_2H$, que está presente en muchos frutos y cuya variedad d-l-tartárica recibe el nombre de *ácido racémico*, y el **ácido cítrico** $CO_2H - CH_2 - \underset{HO \diagup \diagdown CO_2H}{C} - CH_2 - CO_2H$, inactivo a la luz polarizada, que se extrae del zumo de limón.

Ácidos cetonas

Acido y éster acetilacético. — Se puede considerar que el ácido acetilacético, $CH_3 - CO - CH_2 - CO_2H$, resulta al substituir un átomo de hidrógeno del radical metilo del ácido acético por un radical acetilo $CH_3 - CO$. Es un **ácido β-cetónico.** Es inestable, y se transforma fácilmente en acetona por pérdida de una molécula de anhídrido carbónico:



$$CH_3 - CO - CH_2 - CO_2H \longrightarrow CH_3 - CO - CH_3 + CO_2.$$

Su éster etílico, estable, se obtiene condensando dos moléculas de acetato de etilo en presencia de sodio:



$$2CH_3 - CO_2 - C_2H_5 \rightarrow CH_3 - CO - CH_2 - CO_2 - C_2H_5 + C_2H_5OH.$$

Los dos átomos de hidrógeno medianos tienen carácter ácido, y pueden ser reemplazados por el sodio.

Por acción de los yoduros de alcohilo, se podrá fijar así ya uno, ya dos radicales carbonados, y luego, tras previa hidrólisis y pérdida de anhídrido carbónico, obtener cetonas sintéticas.

Ácidos dicarboxílicos

Acido oxálico. — Este ácido, de fórmula $CO_2H - CO_2H$, existe abundantemente en la naturaleza bajo forma de sales: de calcio, en las paredes celulares, en las algas, líquenes y helechos; ácida de potasio, en diferentes plantas (*Rumex* y *Oxalis*), etc. Se forma en numerosas oxidaciones orgánicas. Se prepara calentando serrín de madera con hidróxido sódico. Actualmente, se obtiene por descomposición del formiato sódico a 400° C aproximadamente, reacción que se efectúa con desprendimiento de hidrógeno:



$$2HCO_2Na \longrightarrow Na - CO_2 - CO_2 - Na + H_2.$$

El ácido oxálico se obtiene fácilmente de la sal así preparada.

Cristaliza con dos moléculas de agua. Es el más fuerte de todos los ácidos orgánicos. Se descompone por efecto del calor o del ácido sulfúrico concentrado, dando óxido de carbono, anhídrido carbónico y agua:



$$H - CO_2 - CO_2H \longrightarrow CO + CO_2 + H_2O.$$

Se emplea como mordiente en el estampado de tejidos y en la industria de los colorantes y tintas.

Es reductor. Su **dinitrilo** $N \equiv C - C - N$ es el compuesto llamado **cianógeno.**

Acidos y ésteres cianacético y malónico. — El **ácido malónico** es el más sencillo de los *ácidos dicarboxílicos* con tres átomos de carbono:



$$CO_2H - CH_2 - CO_2H.$$

Este compuesto es inestable a temperatura superior a su punto de fusión, y se transforma en ácido acético por pérdida de una molécula de anhídrido carbónico. Otro tanto ocurre con el mononitrilo o ácido cianacético $N \equiv C - CH_2 - CO_2H$.

El **éster cianacético** se obtiene fácilmente por acción del cloroacetato de etilo sobre el cianuro potásico. Es estable.



$$N{\equiv}C - \boxed{K + Cl} - CH_2 - CO_2 - C_2H_5 \rightarrow N{\equiv}C - CH_2 - CO_2 - C_2H_5 + KCl$$

El malonato de etilo, $C_2H_5 - CO_2 - CH_2 - CO_2 - C_2H_5$, se forma a partir de él, por acción del alcohol etílico.

En estos dos ésteres, los átomos de hidrógeno del carbono mediano son ácidos (Cf. éster acetilacético). Por acción sucesiva del sodio y de un yoduro de alcohilo, e hidrólisis ulterior del éster, se obtienen ácidos o nitrilos sintéticos.

Aminoalcoholes y aminoácidos

El más sencillo de los **aminoalcoholes** es el alcohol aminoetílico $NH_2 - CH_2 - CH_2OH$. De este compuesto se deriva la *colina*, $HO(CH_3)_3 - N - CH_2 - CH_2OH$, componente básico de la *lecitina* (bilis, yema del huevo).

Los **aminoalcoholes** se llaman también *alcaminas* y *alcanolaminas*.

De los **aminoácidos,** uno de los más importantes, y a la vez el más sencillo, es el **ácido aminoacético,** $NH_2 - CH_2 - CO_2H$, o **glicocola,** cuya amida benzoica, el *ácido hipúrico* (véase la figura de la página 312), se encuentra en la orina de los herbívoros. La *alanina*, la *valina*, la *leucina* y otros, son homólogos del anterior, y se forman en la hidrólisis de las **materias albuminoideas** o **albuminoides,** compuestos nitrogenados que desempeñan un papel primordial en los fenómenos de la vida.

Serie cíclica

Generalidades: Clasificación de los compuestos cíclicos. Formación de los ciclos. Estabilidad. Combinaciones alicíclicas. Núcleos. Homología en la serie cíclica. División del estudio. — **Serie alicíclica:** Generalidades. Compuestos terpénicos. Esteroles. — **Serie bencénica:** *Núcleo e hidrocarburos bencénicos*: Derivados aromáticos. *El núcleo o anillo bencénico:* Constitución. Fórmulas simplificadas. Isomería. Funciones derivadas del núcleo. Nomenclatura. — **Hidrocarburos bencénicos:** Propiedades químicas generales. Reacciones de adición del núcleo. Reacciones de substitución del núcleo. Reacciones de las cadenas laterales. Pirogenación de los hidrocarburos bencénicos. Propiedades físicas. Preparación. Términos particulares. — **Funciones del núcleo bencénico:** Generalidades. *Fenoles*: Generalidades. Propiedades físicas. Propiedades del hidroxilo fenólico. Propiedades del núcleo. Preparación de los fenoles. Términos particulares. Polifenoles. *Derivados sulfonados*: Preparación. Sulfatos alcalinos. Propiedades físicas. Propiedades químicas. Utilización de la sulfonación. *Derivados nitrados*: Preparación. Propiedades físicas. Propiedades químicas. Términos particulares. *Arilaminas*: Definición. Propiedades físicas. Basicidad. Preparación de las arilaminas primarias. Propiedades químicas. Términos particulares. Arilaminas secundarias y terciarias. Aminofenoles. *Diazoicos*: Definición. Preparación de las sales de diazonio. Reacciones con eliminación de nitrógeno. Reacciones sin eliminación de nitrógeno. *Quinonas*: Generalidades. — **Funciones de las cadenas laterales:** Generalidades. *Derivados halogenados. Alcoholes. Aldehídos*: Aldehído benzoico. Propiedades químicas del aldehído benzoico. Otros aldehídos. *Aldehídos fenoles. Cetonas. Ácidos*: Propiedades. Otros ácidos. *Ácidos fenoles*: Síntesis. *Diácidos*: Ácido ftálico. — **Núcleos complejos:** Generalidades. *Grupo del naftaleno*: Naftaleno. Naftoles y naftilaminas. *Grupo del antraceno*: Antraceno. Antraquinona. — **Nociones someras sobre los colorantes:** Constitución de los colorantes. Formación de colorantes derivados del trifenilmetano. Indofenoles e indaminas. — **Serie heterocíclica:** Generalidades. Ciclos pentagonales. Ciclos hexagonales. Ciclos complejos. Ureidos. Alcaloides. — **Apéndice:** Vitaminas. Vitaminas hidrosolubles. Vitaminas liposolubles. Hormonas. Antibióticos

Generalidades

Clasificación de los compuestos cíclicos. — Los compuestos **cíclicos** contienen por lo menos una cadena cerrada en su molécula.

Hay que establecer una diferencia entre los compuestos **carbocíclicos,** cuya cadena cerrada está constituida exclusivamente por átomos de carbono, y los compuestos **heterocíclicos,** cuya cadena comprende átomos de carbono y otros de naturaleza diferente. El *oxígeno*, el *azufre* y el *nitrógeno* pueden formar parte de los heterociclos.

Formación de los ciclos. Estabilidad. — Los ciclos más sencillos constan de tres eslabones. El hidrocarburo $CH_2 — CH_2$ se obtiene



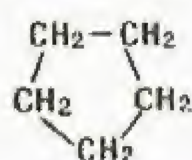
al tratar el 1,3-dibromopropano, Br — CH_2 — CH_2 — CH_2 — Br, con cinc. En esta reacción, los dos átomos de bromo pasan a formar bromuro de cinc, y la cadena carbonada se cierra.

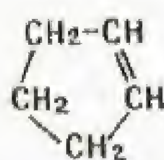
Si se efectúa esta misma operación con otros derivados dibromados alifáticos de cadena cada vez más larga, se pueden obtener ciclos hasta de ocho eslabones.

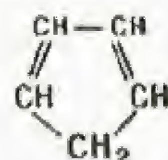
La **estabilidad** y la **frecuencia** de estos ciclos son distintas en los diferentes casos. Los ciclos que constan de **cinco** y **seis** eslabones (ciclos **pentagonales** y **hexagonales)** son los que presentan mayor aptitud para formarse, y ofrecen además la mayor resistencia a la ruptura. Ya hemos visto anteriormente que los heterociclos de estas categorías se obtienen fácilmente a partir de los *glicoles, ácidos alcoholes*, γ o δ.

Observación. — La tendencia a formar cadenas cerradas se atenúa cuando los ciclos contienen ocho eslabones; sin embargo, existen, en contados casos, ciclos que constan de trece a dieciocho átomos de carbono.

Combinaciones alicíclicas. — Los compuestos carbocíclicos más sencillos son los hidrocarburos alicíclicos. Entre éstos, los **ciclanos** son saturados, los **ciclenos** poseen **un doble enlace** etilénico en la cadena, y los **cicladienos** contienen **dos dobles enlaces.**





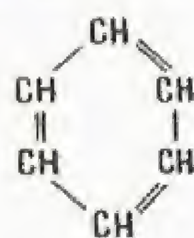


Estas tres fórmulas son, respectivamente, la del *ciclopentano*, el *ciclopenteno* y el *ciclopentadieno*.

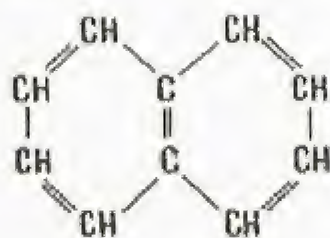
Todos estos compuestos presentan grandes analogías con los hidrocarburos alifáticos. De manera especial, el carácter no saturado de los dobles enlaces es patente (al igual que en el caso de los alifáticos).

Los ciclanos, ciclenos y ciclodienos y sus derivados, constituyen una serie de compuestos denominados *alicíclicos* (que se asemeja a la palabra alifático).

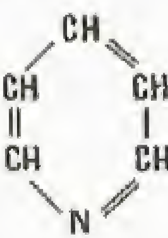
Núcleos. — Se llama **núcleos** (o **anillos)** a los ciclos hexagonales que constan de tres dobles enlaces, separados por otros tres enlaces sencillos. El más simple de todos ellos es el del benzol.



benceno



naftaleno



piridina

Existen núcleos complejos, tales como el del *naftaleno*. El heterociclo nitrogenado de la piridina constituye igualmente un núcleo.

Los núcleos se diferencian de los demás ciclos por su carácter *poco acusado de no saturación* (o insaturación). Los cuerpos que los contienen dan con mayor facilidad compuestos de **substitución** que compuestos de **adición.** Son muy **resistentes a la acción de los oxidantes,** los cuales provocan, en cambio, la ruptura de la cadena cerrada de los compuestos alicíclicos. Al contrario de estos últimos compuestos, los cuerpos que encierran núcleos no manifiestan tendencia alguna a la polimerización.

Por otra parte, las *funciones que se ligan directamente al núcleo* adquieren ciertas propiedades particulares.

El conjunto de todas estas particularidades justifica la apelación especial que se da a estos tipos de ciclos.

Homología en la serie cíclica. — En la serie de compuestos cíclicos, se considera como **homólogos** los cuerpos que poseen el mismo ciclo y las mismas funciones, y que se diferencian únicamente por los radicales alcohilo fijados en el ciclo como substituyentes de los átomos de hidrógeno.

Las cadenas ligadas a los núcleos se llaman *cadenas laterales*. Las funciones que se fijan en las cadenas laterales presentan las propiedades generales de las funciones alifáticas.

División del estudio. — Vamos a estudiar sucesivamente:

La **serie alicíclica** (breve reseña solamente);

La **serie bencénica,** los compuestos con **núcleos complejos** y los compuestos con **varios núcleos.**

Daremos, por último, unas cuantas nociones sobre la **serie heterocíclica.**

Serie alicíclica

Generalidades. — Los compuestos de la serie alicíclica recuerdan, por sus propiedades, los cuerpos acíclicos.

Se dividen en *ciclanos, ciclenos* y *cicladienos*, según sean saturados o posean uno o dos enlaces dobles.

Los ciclos pueden comprender de tres a ocho átomos de carbono (ciclopropano, ciclobutano, ciclopentano, ciclohexano, cicloheptano, ciclooctano).

Los compuestos del *ciclohexano* pueden ser obtenidos fácilmente por hidrogenación catalítica de los compuestos bencénicos en presencia de níquel finamente dividido. Así, el *benceno* C_6H_6 conduce a la formación del **ciclohexano** C_6H_{12}, *el fenol* C_6H_5 — OH al **ciclohexanol** C_6H_{11} — OH, que posee las propiedades de un alcohol secundario, y la *anilina* C_6H_5 — NH_2 a la **ciclohexilamina** C_6H_{11} — NH_2, base primaria, mucho más fuerte que una arilamina: en efecto, azulea el tornasol y se combina con el anhídrido carbónico como las aminas de la serie alifática.

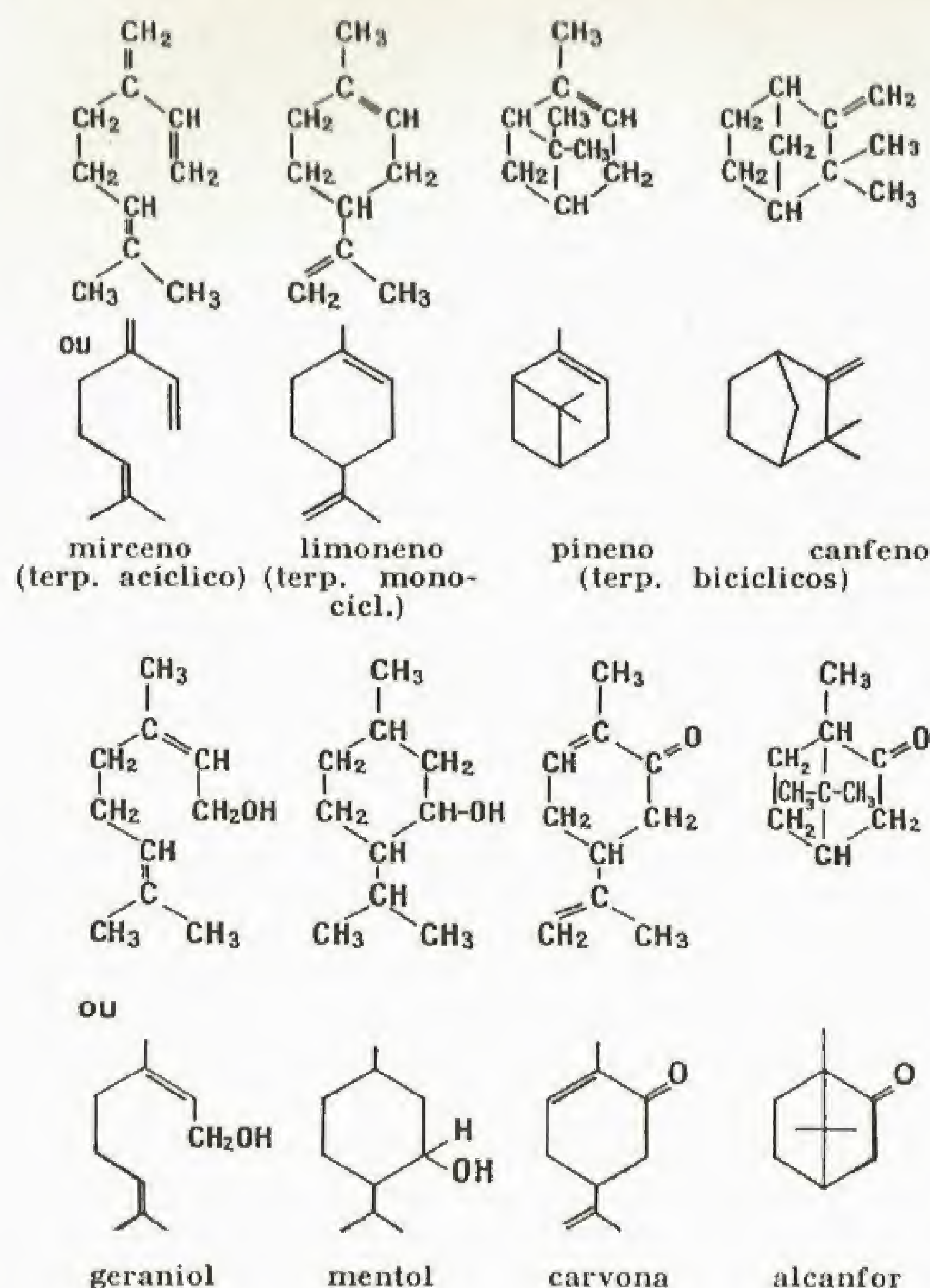
La serie alicíclica comprende igualmente los **compuestos terpénicos,** de los que existe una gran variedad en las *esencias naturales* o *aceites vegetales* extraídos por destilación de los órganos olorosos de los vegetales. Se suele agrupar todos estos cuerpos para su estudio, puesto que su estructura carbonada se deriva del hexahidrocimol, $C_{10}H_{20}$ (el cimol es un hidrocarburo bencénico).

En general, se asimila a este grupo algunos compuestos *acíclicos* con diez átomos de carbono, que tienen la propiedad de formar ciclos fácilmente por isomerización.

Compuestos terpénicos. — Los compuestos terpénicos comprenden una serie de *hidrocarburos*, llamados *terpenos*, así como los *alcoholes, aldehídos* y *cetonas* que se derivan de ellos.

La fórmula general de los **terpenos** es $C_{10}H_{16}$. Se dividen en terpenos *acíclicos*, que poseen tres enlaces dobles, terpenos *monocíclicos*, que poseen una cadena cerrada y dos enlaces dobles, y terpenos *bicíclicos*, que poseen dos cadenas cerradas ligadas entre sí por medio de un **"puente"** (enlace suplementario entre carbonos solidarios del ciclo). Los terpenos bicíclicos presentan un solo enlace doble.

Si se exceptúa el canfeno, que es sólido, los terpenos son líquidos, incoloros, generalmente activos a la luz polarizada. Se isomerizan y polimerizan fácilmente. Damos a continuación las fórmulas de algunos de ellos. El *limoneno* tiene olor a limón y se encuentra en las esencias de limón y de bergamota. El *pineno* es el constituyente principal de las esencias de trementina.

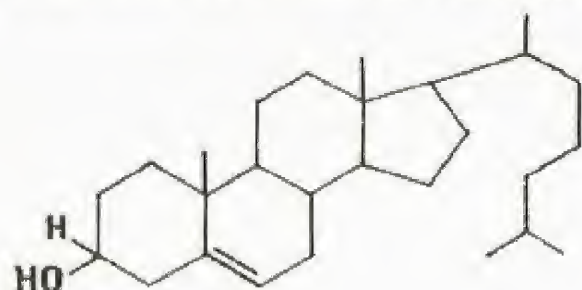


Entre los derivados terpénicos citaremos: el *geraniol*, alcohol acíclico con olor a rosa; el *citral*, que es el aldehido correspondiente al anterior, con olor a limón; el *mentol*, alcohol monocíclico extraído de la esencia de menta, y la *mentona*, que es la cetona correspondiente; la *carvona*, cetona monocíclica presente en las esencias de comino y de eneldo, y el *alcanfor*, cetona bicíclica.

Al lado de los terpenos $C_{10}H_{16}$ se encuentran en los aceites esenciales los **sesquiterpenos** $C_{15}H_{24}$ y los **diterpenos** $C_{20}H_{32}$, que hierven a temperaturas elevadas. Su constitución no ha sido aún completamente establecida; por otra parte, no ofrecen interés alguno en perfumería.

El **caucho** puede ser considerado como un producto de polimerización de un hidrocarburo no saturado C_5H_8, llamado *isopreno*, que se asemeja a los terpenos. Dada su fórmula, puede ser considerado como un *hemiterpeno* ($C_5H_8 = \frac{1}{2} C_{10}H_{16}$).

Esteroles. — Los *esteroles*, que corresponden a la función alcohol, se hallan muy difundidos en los reinos vegetal y animal. Entre los más importantes, citaremos al *colesterol* ($C_{27}H_{46}O$).



Un gran número de compuestos naturales presentan estructuras de tipo similar: se trata de los *esteroides*. Más adelante veremos unos cuantos ejemplos de estos compuestos (vitaminas, hormonas, etc.).

Serie bencénica o aromática

Núcleo e hidrocarburos bencénicos

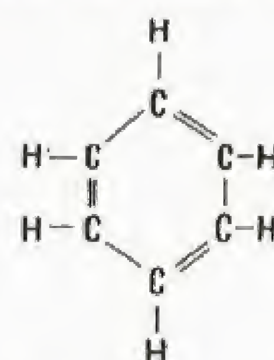
Derivados aromáticos. — Dado que gran número de cuerpos olorosos naturales corresponden a la serie bencénica (vocablo derivado etimológicamente de *benjuí*), se designa frecuentemente ésta con el nombre de serie **aromática** y, por extensión, se ha dado el nombre de derivados aromáticos a todos los compuestos bencénicos.

Conviene, sin embargo, tener bien presente que existen numerosos compuestos llamados aromáticos que no manifiestan olores agradables y que, por otra parte, los cuerpos que tienen aromas agradables no pertenecen exclusivamente a la serie bencénica (ésteres, compuestos terpénicos, etc.).

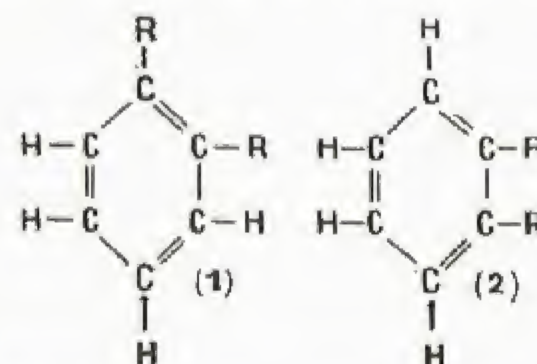
El núcleo o anillo bencénico

Constitución. — El benceno o benzol, C_6H_6, se representa generalmente por la fórmula trietilénica propuesta por Kekulé.

Conviene hacer constar que la molécula ofrece una simetría hexagonal perfecta, y que a las dos fórmulas *diferentes en apariencia* que se pueden atribuir a un derivado disubstituido (esquemas 1 y 2) corresponde única y exclusivamente un mismo cuerpo.



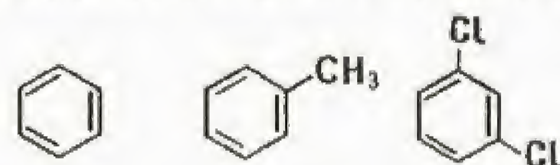
Se puede explicar este hecho si se admite la posibilidad de que los enlaces dobles emigran fácilmente en el interior del núcleo.



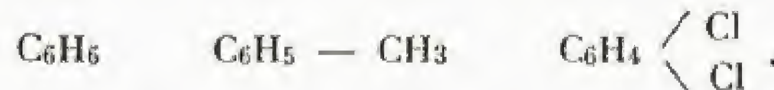
Representaciones equivalentes de un dialcohilbenceno

Fórmulas simplificadas. — En general, se representa el núcleo por un hexágono que contiene tres enlaces dobles. Los derivados de substitución se formulan inscribiendo los radicales que substituyen al hidrógeno frente al vértice correspondiente del hexágono.

Los esquemas que damos a continuación representan respectivamente el *benceno*, el *metil benceno* o *tolueno* y un *dicloro benceno*



cuyas fórmulas se representan frecuentemente sin desarrollar los núcleos:



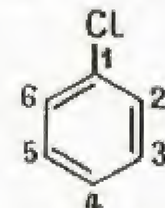
$$C_6H_6 \qquad C_6H_5 - CH_3 \qquad C_6H_4 \begin{cases} Cl \\ Cl \end{cases}.$$

Isomería. — La isomería de los **derivados del núcleo** bencénico depende de las **posiciones** que ocupan los radicales substituyentes.

Se pueden definir estas posiciones numerando de 1 a 6 los vértices del hexágono (uno de los grupos ocupa la posición 1).

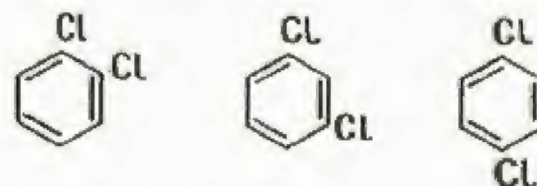
En estas condiciones, **si todos los radicales son idénticos,** existen:

1 derivado **monosubstituido:**



clorobenceno

3 derivados **disubstituidos,** que se diferencian por las apelaciones **orto** (posición 1-2), **meta** (posición 1-3) y **para** (posición 1-4); en abreviatura, *o*, *m*, *p*:

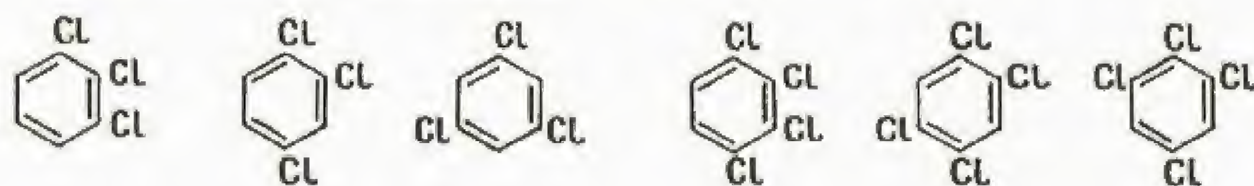


1-2 u orto (*o*); 1-3 o meta (*m*); 1-4 o para (*p*)

diclorobencenos

3 derivados **trisubstituidos** (1.2.3., 1.2.4., 1.3.5.): posiciones designadas por las letras *v* (vecino), *a* (asimétrico) y *s* (simétrico):

3 derivados **tetrasubstituidos** (1.2.3.4., 1.2.4.5., 1.2.4.6.):

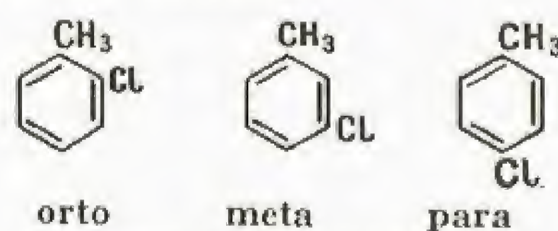


1 derivado **pentasubstituido** (C_6HCl_5 (pentaclorobenceno);

1 derivado **hexasubstituido** C_6Cl_6 (hexaclorobenceno).

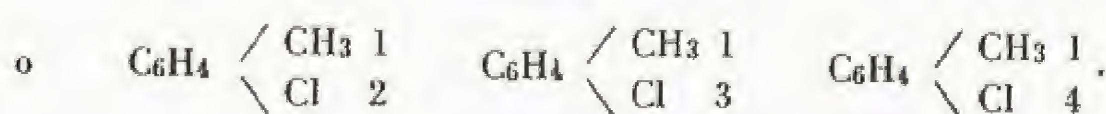
Si todos los radicales **no son idénticos,** el número de isómeros es mayor.

De todas maneras, existen solamente tres isómeros disubstituidos, incluso si los radicales son diferentes



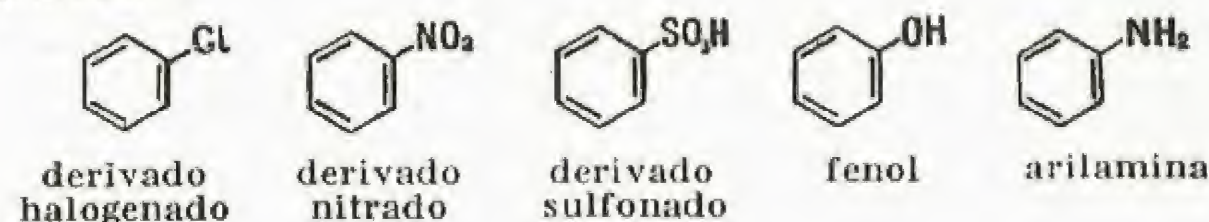
orto meta para

clorotolueno



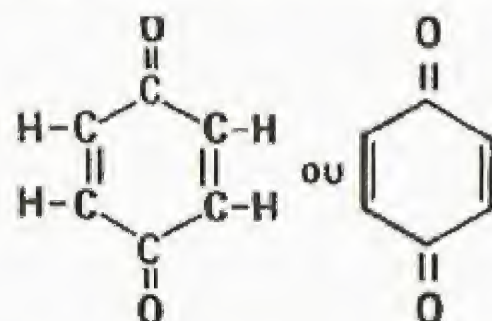
$$\text{o} \quad C_6H_4 \begin{cases} CH_3 & 1 \\ Cl & 2 \end{cases} \quad C_6H_4 \begin{cases} CH_3 & 1 \\ Cl & 3 \end{cases} \quad C_6H_4 \begin{cases} CH_3 & 1 \\ Cl & 4 \end{cases}.$$

Funciones derivadas del núcleo. — Las funciones derivadas del núcleo difieren sensiblemente de las funciones acíclicas. Citaremos las principales:



derivado halogenado | derivado nitrado | derivado sulfonado | fenol | arilamina

Las **quinonas** son en cierto modo dicetonas, que corresponden a una constitución especial del núcleo, el cual consta solamente de dos enlaces dobles.



Nomenclatura. — Las reglas enunciadas en Ginebra encuentran ciertas dificultades de aplicación en la serie bencénica.

Los cuerpos son designados, en general, ya mediante nombres particulares: *tolueno:* $C_6H_5 - CH_3$, *resorcinol* $C_6H_4 \langle {}^{OH\ 1}_{OH\ 3}$, etc., ya enunciando los nombres de los radicales substituyentes: el tolueno es el *metilbenceno*, el resorcinol es el *meta-dihidroxibenceno*, el compuesto $C_6H_4 \langle {}^{OH\ 1}_{Cl\ 2}$ es el *ortoclorofenol*, etc.

Se llama **arilos**, por oposición a **alcohilos** o **alquilos**, a los radicales derivados del núcleo bencénico.

El radical monovalente C_6H_5— o **fenilo** (de *fenol*) es un arilo. Existen tres homólogos isómeros, $C_6H_4 \langle {}^{CH_3}$, los **toluilos** o **cresilos** (orto, meta y para).

El radical divalente $C_6H_4 \langle$ es conocido con el nombre de **fenileno.** Existen tres fenilenos: orto, meta y para.

Hidrocarburos bencénicos

Propiedades químicas generales. — En los hidrocarburos bencénicos, que son los cuerpos más simples de la serie, hay que diferenciar el **núcleo** del benceno de las **cadenas laterales** acíclicas que se fijan en él.

Ya hemos indicado, en lo que respecta al núcleo, que el carácter de **no saturación** es poco marcado. A pesar de ello, se pueden obtener, con los compuestos a que da lugar, reacciones de **adición** que, naturalmente, son menos frecuentes que las reacciones de **substitución.**

Estudiaremos a continuación las propiedades químicas del núcleo y de las cadenas laterales.

Reacciones de adición del núcleo. — 1° La *hidrogenación* del núcleo puede ser realizada por vía *catalítica* en presencia de níquel (v. p. 332). El núcleo bencénico se transforma así por adición de seis átomos de hidrógeno en el *ciclohexano* C_6H_{12}, de cadena cerrada.

2° Por influencia de la luz solar, se pueden fijar seis átomos de cloro o de bromo en una molécula de benceno:

$$C_6H_6 + 3Cl_2 \longrightarrow C_6H_6Cl_6 \text{ (hexacloruro de benceno).}$$

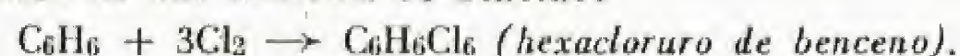
Esta conducta de los halógenos presenta un carácter bastante excepcional, puesto que los derivados de substitución son los que se forman preferentemente.

Reacciones de substitución del núcleo. — El núcleo bencénico da lugar a reacciones de substitución con mucha mayor facilidad que los hidrocarburos saturados. Los átomos de hidrógeno del núcleo son, en efecto, mucho más móviles.

(Además, esta movilidad aumenta considerablemente cuando el núcleo ha fijado un hidroxilo fenólico o un grupo aminógeno NH_2.)

1° *Formación de derivados nitrados* (v. p. 336).

El **ácido nítrico** concentrado reacciona con el benceno, con eliminación de agua:



Se obtiene así un **derivado nitrado;** obsérvese que, en la fórmula, el radical *arilo* está unido directamente al átomo de *nitrógeno* (cf. nitroglicerina p. 330);

2° *Formación de derivados de sulfonados* (v. p. 336).

El **ácido sulfúrico** concentrado o fumante reacciona con el núcleo bencénico y da lugar a los **derivados sulfonados** o **ácidos sulfónicos.**



La unión del arilo con el radical sulfónico se efectúa por mediación del átomo de azufre.

La **nitración** *y la* **sulfonación** *son otras tantas reacciones características de los núcleos.* Los derivados sulfonados y nitrados desempeñan un papel importante en síntesis.



3° *Halogenación del núcleo.* El cloro y el bromo pueden fijarse en el núcleo por substitución, con eliminación de hidrácido:



Se obtienen así los **derivados halogenados del núcleo** (v. p. 334), menos reactivos que los de la serie acíclica.

Para obtener estos cuerpos, es necesario operar en presencia de *catalizadores* (metales, cloruros metálicos, etc.) y en medio anhidro. Se pueden fijar varios halógenos.

La halogenación puede lograrse también en las cadenas laterales (v. p. 338);

4° *Reacciones de Friedel y Crafts.* Los **derivados clorados acíclicos** y los **cloruros ácidos** reaccionan con el núcleo de los hidrocarburos bencénicos, con eliminación de ácido clorhídrico.

La reacción se efectúa en presencia de **cloruro de aluminio anhidro** ($AlCl_3$), que actúa como catalizador. Se forma, en una etapa intermedia, un compuesto organometálico inestable.

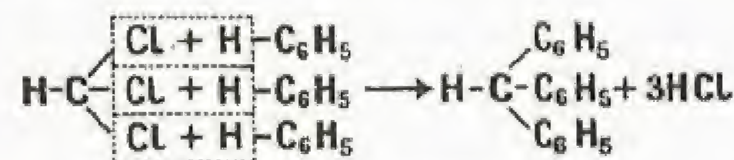
Estas condensaciones, descubiertas por Friedel y Crafts, han permitido realizar numerosas síntesis. Damos a continuación unos cuantos ejemplos:

a) La acción de los *halogenuros de alcohilo* conduce a la formación de los *hidrocarburos bencénicos* homólogos:



b) Los derivados *policlorados* dan lugar a hidrocarburos con *varios núcleos*, o con *núcleos complejos.*

El cloroformo, por ejemplo, se condensa con tres moléculas de benceno y conduce así al trifenilmetano:



c) Los *cloruros de ácidos* forman cetonas:



etcétera.

5° *Condensaciones diversas.* Los **aldehídos** y los **ácidos aromáticos** pueden condensarse con el núcleo bencénico, con eliminación de agua. Estas reacciones ocurren con mayor facilidad en presencia de las funciones fenoles o aminas.

Reglas que rigen las substituciones. — Cuando se fija un nuevo radical en un núcleo que posee ya una substitución, la ***naturaleza del primer substituyente*** determina las posiciones en las cuales puede fijarse el segundo.

La presencia en el núcleo de uno cualquiera de los radicales siguientes:

$$- R, - X, - OH, - NH_2,$$

(R es un alcohilo, X un halógeno)

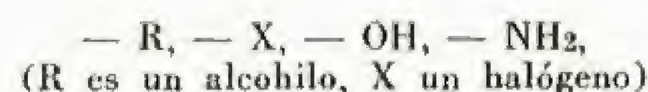
orienta simultáneamente al segundo en las posiciones *orto* y *para.* (Según el caso, uno de los dos isómeros puede formarse en cantidad preponderante.)

Por el contrario, los radicales

$$- CO_2H, - NO_2, - SO_3H$$

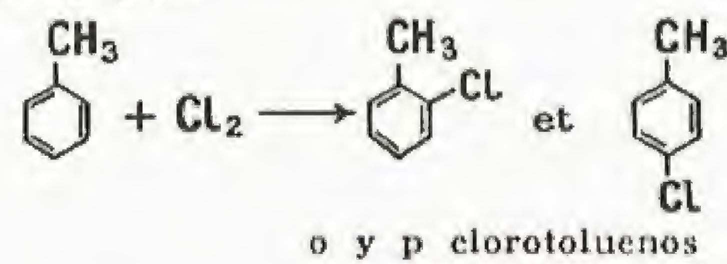
orientan al segundo substituyente en la posición *meta.*

Así, la cloruración del tolueno conduce a la formación de los dos clorotoluenos orto y para:





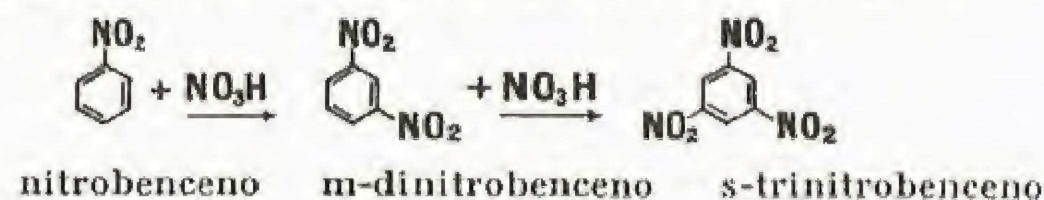
o y p clorotoluenos



Ocurre otro tanto cuando se fija un átomo de cloro en el clorobenceno.

Es fácil ver que la cloruración sucesiva del *benceno* puede dar lugar al derivado hexaclorado Cl_6C_6.

En cambio, el *nitrobenceno* $C_6H_5 - NO_2$ se nitra de nuevo en *meta.* El dinitrobenceno da a continuación el derivado trinitrado 1-3-5:



nitrobenceno | m-dinitrobenceno | s-trinitrobenceno

Por lo tanto, es imposible obtener por *nitración directa* más de tres radicales NO_2 en el benceno.

Observación. — La *nitración* del *cloro*benceno conduce a la formación de los derivados $C_6H_4 \langle {}^{Cl}_{NO_2}$ *orto* y *para.* En cambio, la *cloruración* del *nitrobenceno* conduce al isómero *meta.*

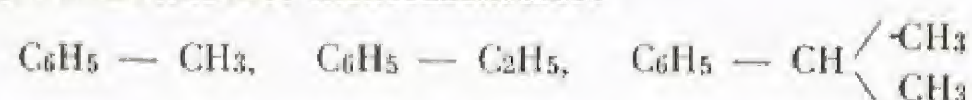
Reacciones de las cadenas laterales. — Las cadenas laterales presentan las propiedades generales de los radicales acíclicos. Las funciones que se fijan son en todo punto comparables a las funciones acíclicas. El compuesto $C_6H_5 - CH_2OH$ ofrece, de manera especial, todos los caracteres de los *alcoholes.* Sin embargo, la vecindad del núcleo

confiere al primer átomo de carbono de la cadena lateral una sensibilidad particular a la oxidación y cierta tendencia a la halogenación.

1° *Oxidación.* Cuando se hace reaccionar un oxidante (ácido nítrico diluido, permanganato potásico, mezcla sulfocrómica) con un núcleo en el que están fijadas dos cadenas laterales, éstas se transforman en una función ácido fijada directamente en el núcleo.

El ataque de las cadenas es tanto más fácil cuanto más largas y más ramificadas son.

Así, los hidrocarburos monosubstituidos



$$C_6H_5 - CH_3, \quad C_6H_5 - C_2H_5, \quad C_6H_5 - CH\begin{matrix} \diagup CH_3 \\ \diagdown CH_3 \end{matrix}$$

conducen todos a la formación del mismo ácido $C_6H_5 - COOH$ *(ácido benzoico).*

Cuando el núcleo consta de varias cadenas, se obtienen poliácidos.

Estas reacciones de oxidación ofrecen gran interés, puesto que permiten *determinar la posición de las cadenas laterales.*

2° *Halogenación.* El cloro y el bromo se fijan por substitución en las cadenas laterales, particularmente en el átomo de carbono vecino del núcleo; estas reacciones se efectúan en ausencia de catalizadores.

Así, el *tolueno* en ebullición reacciona con el cloro y da *cloruro de bencilo* (v. p. 338):



$$C_6H_5{-}CH_2{-}\boxed{H + Cl}{-}Cl \longrightarrow C_6H_5{-}CH_2{-}Cl + HCl$$

Pirogenación de los hidrocarburos bencénicos. — Las reacciones de pirogenación conducen a la obtención de hidrocarburos bencénicos más condensados.

Por su parte, el benceno se forma por efecto del calor sobre el acetileno: $3HC \equiv CH \longrightarrow C_6H_6$ (v. p. 320).

En las condensaciones, se pone generalmente en libertad hidrógeno. Citemos, entre otras, la condensación de dos moléculas de *benceno* en *difenilo:*



$$C_6H_5{-}\boxed{H + H}{-}C_6H_5 \longrightarrow C_6H_5{-}C_6H_5 + H_2$$

Se concibe fácilmente que los compuestos con núcleos puedan obtenerse en la destilación de la hulla a expensas, en especial, del acetileno, producto constante de las combustiones incompletas.

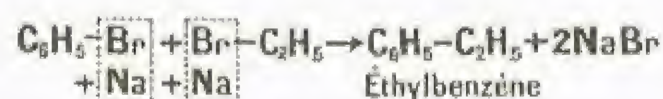
Propiedades físicas. — Los hidrocarburos bencénicos son generalmente líquidos, y los homólogos superiores, sólidos. Incoloros, de olor tenuemente aromático, son poco densos e insolubles en el agua. Son buenos disolventes (grasas, azufre, yodo, fósforo, etc.).

Preparación. — 1° *Extracción del alquitrán de hulla.* El benceno y sus homólogos se encuentran en el alquitrán de hulla. La destilación de los alquitranes de este tipo da lugar a la separación en fracciones que, según las temperaturas entre las cuales hierven, se llaman: *aceites ligeros, aceites medios, aceites pesados* y *aceites de antraceno.*

Los hidrocarburos bencénicos se extraen de los aceites ligeros que destilan por debajo de 150° C.

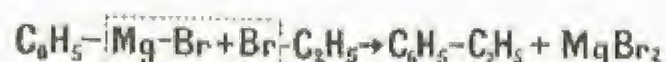
2° *Síntesis.* a) Ya hemos indicado el *método de Friedel y Crafts* (v. p. 333).

b) *Método de Fittig y Tollens.* Esta síntesis constituye una extensión del método de Wurtz, que permite obtener los hidrocarburos acíclicos: se hace reaccionar sodio con una mezcla de bromobenceno y de un bromuro de alcohilo:



$$C_6H_5{-}\boxed{Br} + \boxed{Br}{-}C_2H_5 \longrightarrow C_6H_5{-}C_2H_5 + 2NaBr$$
$$+\boxed{Na} \; +\boxed{Na} \qquad \text{Éthylbenzène}$$

c) Como los derivados bromados de tipo bencénico pueden formar compuestos *orgánicos de magnesio* tales como $C_6H_5 - Mg - Br$, se puede hacer reaccionar estos cuerpos con los halogenuros de alcohilo:



$$C_6H_5{-}\boxed{Mg{-}Br + Br}{-}C_2H_5 \rightarrow C_6H_5{-}C_2H_5 + MgBr_2$$

Términos particulares. — El *benceno,* llamado también *benzol,* es un líquido incoloro, de olor particular. Hierve a 80°,4 C. Cuando es puro, puede solidificarse y fundirse a 5°,4 C.

Al igual que sus homólogos, el benceno se extrae de los aceites ligeros del alquitrán de hulla. Se utiliza como disolvente y para la preparación de numerosos compuestos aromáticos. Los benzoles impuros se emplean como carburantes.

El *tolueno,* $C_6H_5 - CH_3$, o *metilbenceno,* es un derivado importante de la serie. Hierve a 110° C. Permanece en estado líquido a temperaturas bajas, por lo que sirve para la confección de termómetros.

Se forma en la destilación del *bálsamo de Tolú.*



Los tres *xilenos* $C_6H_4\begin{matrix} \diagup CH_3 \\ \diagdown CH_3 \end{matrix}$ se encuentran en el alquitrán de hulla.

El más abundante es el derivado *meta,* mientras que el *orto* se halla en pequeña cantidad en la mezcla. La separación de estos isómeros en estado puro se logra solamente por métodos químicos.

Citemos, además, entre los hidrocarburos bencénicos, el *mesitileno*

$$C_6H_3(CH_3)_3 \ \ 1\text{-}3\text{-}5,$$

o *s-trimetilbenceno,* que se forma en la condensación de la acetona, el *cumol* o *isopropilbenceno* $(CH_3)_2CH - C_6H_5$, y el *cimol* o *parametilisopropilbenceno,* de fórmula



$$CH_3 - C_6H_4 - CH(CH_3)_2 \ \ 1\text{-}4,$$

cuya estructura está estrechamente ligada a la de los compuestos terpénicos.

Funciones del núcleo bencénico

Generalidades. — Mientras que los **halogenuros de alcohilo** desempeñan en la serie acíclica un papel primordial en las síntesis, los **derivados halogenados de los compuestos de arilo** no tienen sino un interés muy limitado. En efecto, el halógeno está en estos cuerpos muy sólidamente ligado al núcleo, y son por lo tanto *poco reactivos.*

Entre las propiedades de la función, subsisten las reacciones del sodio (método de Fittig y Tollens) y el magnesio (formación de derivados organometálicos). No nos ocuparemos de estos compuestos: nos limitaremos a decir que son líquidos o sólidos, de olor tenuemente aromático.

En cambio, las **arilaminas,** de las que la *anilina,* $C_6H_5 - NH_2$, es el prototipo, tienen una gran importancia. Se preparan con gran facilidad por reacción de los hidrocarburos correspondientes con **derivados nitrados.**

Los **fenoles,** de fórmula general $Ar - OH$, pueden ser obtenidos a partir de las arilaminas; se derivan igualmente de los **derivados sulfonados.** Los principales términos se extraen del alquitrán de hulla. Estos cuerpos son, como las arilaminas, de un gran interés, y se prestan, como ellas, a múltiples reacciones. Ya hemos indicado anteriormente que la presencia de los radicales OH y NH_2 facilita las substituciones que se efectúan en las posiciones *orto* y *para.*

Los fenoles y las arilaminas son las materias primas para la obtención de los colorantes artificiales.

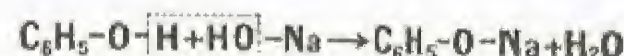
Las **quinonas** ofrecen, por su constitución, un interés teórico.

Fenoles

Generalidades. — La fórmula general de los monofenoles es $Ar - OH$. El primer término es el **fenol ordinario,** $C_6H_5 - OH$. Ciertos fenoles existen en la naturaleza, ya en estado libre *(timol, carvacrol),* ya en estado de éteres *(anetol).*

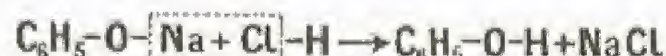
Propiedades físicas. — Los fenoles son unos compuestos líquidos o sólidos con puntos de fusión bajos; poseen aromas acentuados. Son poco solubles o insolubles en el agua y gozan de propiedades antisépticas.

Propiedades del hidroxilo fenólico. — a) *Acidez.* Los radicales arilos exaltan la acidez de la función fenol. Los fenoles, *más ácidos que los alcoholes,* dan lugar a la formación de los derivados metálicos llamados **fenatos,** al reaccionar con los **álcalis** en solución:



$$C_6H_5{-}O{-}\boxed{H + HO}{-}Na \rightarrow C_6H_5{-}O{-}Na + H_2O$$

La adición de un ácido mineral diluido regenera fácilmente el fenol:



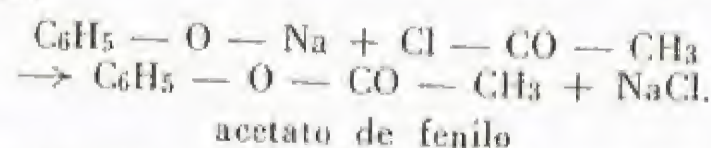
$$C_6H_5{-}O{-}\boxed{Na + Cl}{-}H \rightarrow C_6H_5{-}O{-}H + NaCl$$

Los fenoles no descomponen los carbonatos alcalinos.

La solubilidad de los fenoles en la sosa cáustica permite extraer globalmente estos compuestos de las mezclas que los contienen.

b) *Formación de éteres.* Los fenoles pueden conducir a la obtención de **ésteres** y **éteres;** las reacciones que dan los éteres se efectúan siempre por vía indirecta, pues las eterificaciones directas dan lugar a rendimientos mediocres o prácticamente nulos (diferencia con los alcoholes).

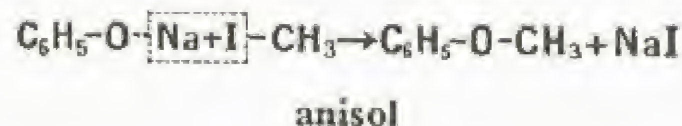
Los ésteres se forman por acción de los *cloruros de ácidos* con los *fenatos alcalinos:*



$$C_6H_5 - O - Na + Cl - CO - CH_3$$
$$\longrightarrow C_6H_5 - O - CO - CH_3 + NaCl.$$

acetato de fenilo

Los éteres se obtienen por reacción de los *fenatos* con los *halogenuros* (o más económicamente con los *sulfatos*) *de alcohilo:*



$$C_6H_5{-}O{-}\boxed{Na + I}{-}CH_3 \rightarrow C_6H_5{-}O{-}CH_3 + NaI$$

anisol

Estas reacciones pueden ser utilizadas para *bloquear* la función fenol con miras a ulteriores reacciones del núcleo bencénico. Los compuestos formados, en especial los ésteres, se hidrolizan fácilmente y regeneran así el fenol.

c) *Desoxidación.* Si se destilan los fenoles con *cinc en polvo,* se obtienen hidrocarburos bencénicos:



$$C_6H_5 - O - H + Zn \longrightarrow C_6H_5 - H + ZnO.$$

Propiedades del núcleo. — Los fenoles dan fácilmente derivados de substitución del núcleo. De manera especial, las nitraciones, sulfonaciones y halogenaciones se efectúan con mayor facilidad que con los hidrocarburos.

Reacciones de condensación. Los fenoles se condensan con numerosos cuerpos. Citaremos especialmente:

a) Los **alcoholes,** que conducen a la formación de los **fenoles homólogos** en presencia de deshidratantes:



$$OH{-}C_6H_4{-}\boxed{H + H{-}O}{-}C_2H_5 \rightarrow OH{-}C_6H_4{-}C_2H_5 + H_2O$$

b) El **cloroformo** y el **ácido fórmico,** que conducen a los **aldehídos fenoles** (v. p. 338);

Instalaciones para el tratamiento del gas de petróleo *(Fot. Chauffard-Rapho)*

c) El **tetracloruro de carbono** y el **anhídrido carbónico,** que dan lugar a los **ácidos fenoles** (v. p. 339);

d) El **anhídrido ftálico** (formación de ftaleínas, v. p. 340);

e) Recordaremos la **copulación** de los fenoles con los diazoicos (v. p. 337), indicando que es posible lograr otras condensaciones que conducen a la obtención de colorantes (v. p. 340);

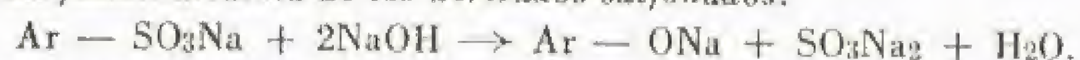
f) El **formol,** que forma con los fenoles productos de condensación complejos, utilizados como materias plásticas con el nombre de **bakelitas.**

Reacciones de adición. Los fenoles se transforman en los *alcoholes secundarios* de la serie del ciclohexano, por **hidrogenación** catalítica.

Reacciones coloreadas. Las soluciones acuosas de los fenoles dan coloraciones intensas en presencia de cloruro férrico, $FeCl_3$.

Preparación de los fenoles. — Las dos reacciones fundamentales que permiten crear la función fenol en el núcleo son:

1º *La fusión alcalina de los derivados sulfonados:*



$$Ar - SO_3Na + 2NaOH \rightarrow Ar - ONa + SO_3Na_2 + H_2O.$$

Se separa a menudo, durante esta reacción, una parte del sulfito sódico que se aglomera en la superficie del fenato fundido.

El producto bruto se trata con agua una vez que se ha enfriado, lo que provoca la disolución del fenato así como la del sulfito restante. El tratamiento ulterior, con un ácido, deja en libertad el fenol, que, poco soluble, se separa fácilmente;

2º *La hidrólisis de las sales de diazoicos:*



$$ArN_2\,\boxed{Cl + H}{-}OH \longrightarrow Ar{-}OH + N_2 + HCl$$

Citaremos, además, la **extracción** de los fenoles a partir de los aceites medios de **alquitrán de hulla,** que basta para hacer frente, en épocas normales, a las necesidades de la industria en fenol ordinario y sus homólogos (cresoles).

Los aceites se agitan con sosa cáustica, que disuelve los compuestos fenólicos. Éstos, puestos en libertad por acción de un ácido, son finalmente separados.

Términos particulares. — El *fenol,* $C_6H_5 - OH$, extraído de los alquitranes, se separa de sus homólogos por destilación. En estado puro, es un sólido incoloro, que funde a 41° C. Hierve a 183° C. Cuando se trata con una cantidad pequeña de agua, permanece en estado líquido a la temperatura ordinaria. Es poco soluble en el agua, tiene olor fuerte y es cáustico y vejigatorio.

Se utiliza para la fabricación del *ácido pícrico* o *trinitrofenol* 2-4-6, empleado como explosivo (melinita), y para el teñido de la seda.

Los *cresoles* $C_6H_4\left<\begin{matrix}CH_3\\OH\end{matrix}\right.$ existen en las tres variedades isómeras, *orto*, *meta* y *para*, en el alquitrán de hulla. Los cresoles brutos emulsionados en el agua sirven como *antiséptico*, con el nombre de *cresil*. Son poco cáusticos, y menos tóxicos que el fenol.

El *timol* y el *carvacrol* son los fenoles derivados del *cimol* (v. página 334).

Su fórmula es $C_6H_3\left<\begin{matrix}CH_3\\OH\\CH(CH_3)_2\end{matrix}\right.$. El timol (isómero 1-3-4) se extrae de la esencia de tomillo, a la que comunica su aroma característico. El carvacrol (isómero 1-2-4) es el principal componente de la esencia de ajedrea.

El *anetol* es el éter metílico de un fenol etilénico: $CH_3 - CH = CH - C_6H_4 - OCH_3$. Este compuesto, sólido (funde a 22° C), es el constituyente fundamental de la esencia de *anís*, a la que confiere su aroma.

Polifenoles. — Los polifenoles son unos cuerpos sólidos, incoloros, solubles en el agua.

Difenoles. Se conocen los tres difenoles $C_6H_4\left<\begin{matrix}OH\\OH\end{matrix}\right.$, que corresponden al benceno. El isómero *orto* es el *pirocatecol*, cuyo éter monometílico $C_6H_4\left<\begin{matrix}OCH_3\\OH\end{matrix}\right.$ es el *gayacol*, contenido en la creosota de la haya. El difenol *meta* es el *resorcinol*, utilizado para la preparación de la fluoresceína. El isómero *para* es la *hidroquinona*, obtenida por reducción de la quinona, y que sirve como revelador fotográfico.

Trifenoles. De los tres trifenoles, citaremos solamente el *pirogalol*, llamado impropiamente ácido pirogálico, $C_6H_3(OH)_3$ 1-2-3, que se forma por descomposición del ácido gálico. Las soluciones alcalinas de pirogalol absorben el oxígeno del aire. El pirogalol sirve como revelador fotográfico.

Derivados sulfonados

Preparación. — Los **derivados sulfonados,** o **ácidos sulfónicos,** de fórmula general $Ar - SO_3H$, se obtienen por reacción del ácido sulfúrico con los hidrocarburos bencénicos:



La sulfonación es, al igual que la nitración, frenada a causa de la formación de agua, por lo que se emplea siempre un exceso de ácido sulfúrico, al que se añade anhídrido sulfúrico, SO_3 (ácido sulfúrico fumante).

Es posible obtener los derivados disulfonados (*meta*) y trisulfonados (1-3-5).

La sulfonación de los fenoles y de las arilaminas se logra con mayor facilidad que la de los hidrocarburos.

Sulfonatos alcalinos. — Se procura generalmente aislar los ácidos sulfónicos en estado de sales sódicas. Para obtenerlos en esta forma, se neutraliza la solución ácida con lechada de cal, lo que provoca la formación de *sulfonato cálcico*, soluble, y de *sulfonato cálcico*, muy poco soluble, que se separan fácilmente uno de otro. Se trata a continuación el sulfonato con la cantidad teóricamente necesaria de carbonato sódico. En esta reacción, el sulfonato alcalino permanece en solución, mientras que el carbonato cálcico se solidifica. El sulfonato se extrae finalmente por concentración de la solución:



Propiedades físicas. — Los ácidos sulfónicos son muy solubles en el agua y no pueden ser destilados. Las sales alcalinas son solubles y cristalizables.

Propiedades químicas. — a) *Hidrólisis.* El vapor de agua a presión regenera los **hidrocarburos** correspondientes, por una reacción inversa a la de la preparación.

b) *Transformación en fenoles.* La reacción fundamental **de los sulfonatos alcalinos** es la que resulta de su escisión por acción de la sosa *fundida*. Se obtiene así un fenol sodado y sulfito sódico:



Los derivados sulfonados constituyen, por consiguiente, una materia prima interesante para la preparación de los fenoles.

Utilización de la sulfonación. — Se utiliza la sulfonación:

1° Para crear *funciones fenoles* en un núcleo;

2° Para volver *solubles* en el agua ciertos colorantes insolubles (la sulfonación no modifica de manera sensible el matiz del colorante);

3° Para la *separación de hidrocarburos*. Así, el paraxileno



que se sulfona fácilmente, se disuelve en el ácido sulfúrico concentrado, mientras que los otros isómeros, insolubles, se separan. El hidrocarburo se regenera a continuación por hidrólisis.

Derivados nitrados

Preparación. — Los derivados **nitrados,** de fórmula general $Ar - NO_2$, se preparan por reacción del ácido nítrico con los hidrocarburos bencénicos:



El agua que se forma frena la reacción y favorece, por otra parte, por dilución, la acción oxidante del ácido nítrico. Por esta razón, se añade generalmente *ácido sulfúrico concentrado*, que actúa como deshidratante (mezcla sulfonítrica).

Es posible obtener los derivados *polinitrados*; el nitrobenzol fija un segundo radical NO_2 en posición *meta*. El metadinitrobenzol $C_6H_4(NO_2)_2$ puede ser transformado a su vez en trinitrobenzol 1-3-5.

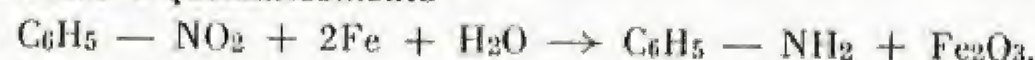
La nitración de los fenoles se consigue fácilmente. La de las arilaminas exige que la función NH_2 esté protegida contra la oxidación. Se "bloquea" en estado de amida acética ($Ar - NH - CO - CH_3$). Una vez efectuada la nitración, se vuelve fácilmente a la amina nitrada, por hidrólisis.

Las aminas y los fenoles se nitran simultáneamente en las posiciones *orto* y *para*.

Propiedades físicas. — Los derivados nitrados de los hidrocarburos aromáticos se presentan en forma de líquidos densos o sólidos, generalmente de color amarillento. Poseen aromas bastante agradables. Son insolubles en el agua.

Propiedades químicas. — Los derivados nitrados, de manera especial los derivados *polinitrados*, pueden **explotar** por efecto del calor o de choques. Las reacciones principales de la función son las que resultan de su **reducción.**

a) Los **reductores enérgicos** (*limaduras de hierro en presencia de ácidos diluidos*) transforman los derivados nitrados en **arilaminas.** Esta reacción constituye la preparación clásica de estas bases. Se puede formular esquemáticamente



El cloruro ferroso, que se origina por contacto del ácido clorhídrico, sirve de intermediario en esta reducción.

b) Los **reductores más suaves** (*en especial el polvo de cinc en presencia de sosa y en solución alcohólica*) pueden dar lugar a la obtención de los compuestos sucesivos que se forman a expensas de dos moléculas de derivado nitrado. Se trata de:

Los derivados **azóxicos** $C_6H_5 - \underset{\diagdown O \diagup}{N - N} - C_6H_5$ (*azoxibenzol*);

Los derivados **azoicos** $C_6H_5 - N = N - C_6H_5$ (*azobenzol*);

Los derivados **hidrazoicos** $C_6H_5 - NH - NH - C_6H_5$ (*hidrazobenzol*);

c) Se pueden obtener, en ciertas condiciones, las **hidroxilaminas** tales como la *fenilhidroxilamina*:



que se puede transponer en paraaminofenol $NH_2 - C_6H_4 - OH$ (v. página 337).

Todos los compuestos que acabamos de citar pueden ser reducidos a *arilaminas* por acción de los reductores enérgicos.

Términos particulares. — El nitrobenzol, $C_6H_5 - NO_2$, funde a 3° C y hierve a 205° C. Se utiliza en la perfumería corriente debido a su olor a almendras amargas. Se prepara, así como sus homólogos, como materia prima para la fabricación de las arilaminas y de otros varios productos.

El *trinitrotoluol*, $CH_3 - C_6H_2(NO_2)_3$ 2-4-6, es un explosivo, así como el *ácido pícrico* o trinitrofenol, $OH - C_6H_2(NO_2)_3$ 2-4-6, empleado corrientemente con el nombre de *melinita*.

Ciertos homólogos del trinotrotoluol tienen olor a almizcle y son utilizados en perfumería.

Arilaminas

Definición. — Las **arilaminas,** llamadas también *aminas fenólicas*, se dividen en aminas **primarias,** de fórmula general $Ar - NH_2$, y en aminas **secundarias** y **terciarias.**

Entre estas últimas, aquellas cuyo átomo de nitrógeno contiene radicales **alcohilo** [p. ej.: $C_6H_5 - NH - C_2H_5$, $C_6H_5 - N(CH_3)_2$] se denominan bases **mixtas;** son las más importantes.

Propiedades físicas. — Las arilaminas son unos compuestos *tóxicos*, líquidos o sólidos. Tienen olor fuerte y desagradable. Son incoloras cuando están recién preparadas, y ennegrecen generalmente a la luz, a pesar de que no se observa una alteración sensible de su pureza. Son muy estables y destilan sin descomponerse. Son poco solubles o insolubles en el agua.

Basicidad. — La presencia del radical *arilo* atenúa considerablemente el carácter básico de la función amina. Las arilaminas son bases mucho más débiles que las aminas alifáticas: no azulean el tornasol, no dan sales más que con los ácidos fuertes y no se combinan con el ácido carbónico. Las sales (clorhidratos, sulfatos) se presentan en estado sólido, cristalizado. Se hidrolizan fuertemente en solución acuosa.

En cambio, los átomos de hidrógeno, libres en el nitrógeno de las bases, tienen un carácter ligeramente ácido y pueden ser reemplazados por el sodio.

Se utiliza la propiedad que tienen de ser solubles en los ácidos diluidos para extraer globalmente los compuestos básicos de las mezclas que los contienen. Las bases se ponen en libertad de nuevo mediante adición de sosa.

Las arilaminas primarias fijan los halogenuros de alcohilo y se transforman en bases secundarias y terciarias mixtas, pero no reaccionan con los derivados halogenados de arilo.

Preparación de las arilaminas primarias. — Estos compuestos se preparan exclusivamente por **reducción de los derivados nitrados** en medio ácido.

Se emplea industrialmente el hierro en presencia de ácido clorhídrico (v. p. 336). La reducción mediante el cloruro de estaño, $SnCl_2$, en presencia de ácido clorhídrico, es cuantitativa, pero no puede ser practicada sino en el laboratorio, dado su precio elevado.

Propiedades químicas. — a) Las arilaminas poseen las propiedades generales de la función amina. Citaremos la obtención de las **amidas,** que se logra fácilmente calentando las arilaminas con ácido acético:



(la amida acética de la anilina es la *acetanilida*).

Esta reacción se utiliza para **bloquear** la función a fin de protegerla contra la acción oxidante de los reactivos.

Se puede bromar o nitrar la acetanilida, sin peligro alguno, y regenerar la anilida bromada o nitrada por simple hidrólisis.

Las arilaminas secundarias mixtas pueden originar también amidas; en cambio, las bases terciarias no poseen esta facultad.

b) *Diazotación.* La reacción de las aminas **secundarias** con el **ácido nitroso** es de una **importancia capital.**

Mientras que las bases *acíclicas* se transforman directamente en *alcohol*, con eliminación de nitrógeno, cuando se tratan con ácido nitroso, las arilaminas conducen a la formación de un compuesto intermedio, llamado diazoico, que puede ser aislado:



Esta reacción recibe el nombre de **diazotación.**

Los diazoicos, que vamos a estudiar en el capítulo siguiente, son las combinaciones de transición que permiten *pasar de las aminas a las demás funciones.*

c) *Reacciones del núcleo.* La presencia del radical NH_2 facilita las **substituciones** en el núcleo. Así, se pueden obtener fácilmente (bloqueando la función en caso necesario) las bases **halogenadas** (en *orto* y *para*), **nitradas** y **sulfonadas** (principalmente en *para*).

Entre las reacciones de **condensación,** citemos la copulación con los diazoicos y todas las reacciones, numerosas, que dan lugar a los **colorantes** (v. columna siguiente y p. 340).

La condensación de las bases primarias con el *glicerol* conduce a la formación del núcleo de la *quinoleína* (v. p. 340).

Términos particulares. — La *anilina*, $C_6H_5 - NH_2$, es un líquido que hierve a 185° C, poco soluble en el agua. Tiñe de violeta las soluciones de los hipocloritos.

La *acetanilida* sirve como febrífugo (antifebrina).

Las *toluidinas* $C_6H_4 \begin{smallmatrix} / CH_3 \\ \backslash NH_2 \end{smallmatrix}$ son los homólogos de la anilina. Los isómeros *orto* y *para*, que se obtienen por reducción de los orto y paranitrotoluoles, son los más corrientes.

La *xilidina* comercial es una mezcla de isómeros $C_6H_3 \begin{smallmatrix} / NH_2 \\ \backslash (CH_3)_2 \end{smallmatrix}$.

Arilaminas secundarias y terciarias. — Al calentar en autoclave la anilina con los alcoholes, en presencia de ácido clorhídrico, se obtienen fácilmente las aminas secundarias y terciarias mixtas, tales como la *monometilamilina*, $C_6H_5 - NHCH_3$, y la *dimetilanilina*, $C_6H_5 - N(CH_3)_2$. Se utilizan en la industria de los colorantes.

La *difenilamina*, $(C_6H_5)_2NH$, es una base secundaria. Se utiliza como estabilizador de los explosivos. Se obtiene por reacción de la anilina con el clorhidrato de anilina.

Aminofenoles. — El *paraaminofenol*



$OH - C_6H_4 - NH_2$ 1-4

se forma en la reducción del nitrobenzol por transposición de la *fenilhidroxilamina*, $C_6H_5 - NH - OH$ (v. p. 336).

Se utiliza para la preparación de reveladores fotográficos y de ciertos medicamentos. Reductor, se oxida fácilmente en quinona.

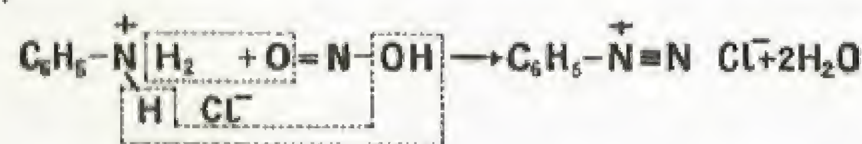
Diazoicos

Definición. — En la forma ArN_2OH, los diazoicos son inestables. En cambio, los compuestos forman, con los ácidos, sales, tales como el cloruro ArN_2Cl, que se obtienen por vía directa en la diazotación de las aminas. Se atribuye a estas sales la constitución denominada "diazonio". La fórmula desarrollada del cloruro es $Ar - N^+ \equiv N\ Cl^-$: se le llamará cloruro de arildiazonio (p. ej.: $C_6H_5 - N^+ \equiv NCl^-$, cloruro de fenildiazonio).

Si se añade un álcali en exceso a la solución de la sal de diazonio, se obtiene un diazotato alcalino, igualmente soluble. Se atribuye a las sales de sodio la fórmula general $Ar - N = N - O - Na$.

Preparación de las sales de diazonio. — Las sales de diazonio se preparan en *solución acuosa*. Se añade poco a poco nitrito sódico, NO_2Na, a la solución de una sal de amina primaria que contiene un exceso de ácido mineral. Se opera generalmente a una temperatura inferior a 5° C.

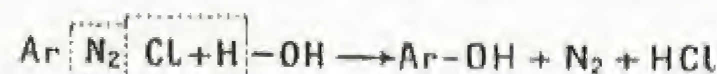
El ácido nitroso que se forma reacciona inmediatamente con la sal de la base:



Las sales de los diazoicos no se aislan en estado seco, pues son inestables en este estado y se descomponen con explosión. Todas las reacciones se efectúan con sus soluciones.

Reacciones con eliminación de nitrógeno. — La sal de diazonio $Ar - N^+ \equiv N\ Cl^-$ conduce, con desprendimiento de nitrógeno, a las funciones siguientes:

1° **Al fenol Ar — OH.** Esta reacción es la hidrólisis normal del diazoico. Se efectúa por elevación de la temperatura:



2° **Al derivado halogenado Ar — X.** La sal correspondiente del diazoico $Ar - N_2 - X$ se descompone por acción del polvo de *cobre*, que actúa como catalizador:



$$Ar - N_2 - X \longrightarrow Ar - X + N_2.$$

Se obtiene el mismo resultado por reacción del halogenuro cuproso Cu_2X_2 con el sulfato del diazoico.

3° **Al hidrocarburo Ar — H.** Se *reduce* el diazoico con *alcohol*, que se deshidrogena en aldehído:



$$Ar - N_2 - Cl + H_2 \longrightarrow Ar - H - N_2 + HCl.$$

4° **Al nitrilo Ar — C ≡ N.** Se trata la solución con *cianuro cuproso*. Se forma el cianuro del diazoico que se descompone:

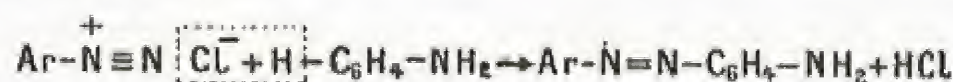


$$Ar - N_2 - C \equiv N \longrightarrow Ar - C \equiv N + N_2.$$

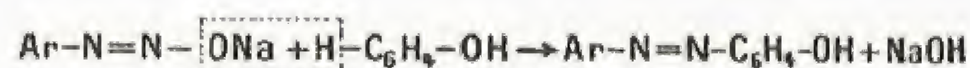
Puesto que el nitrilo puede saponificarse ulteriormente, este método permite obtener los *ácidos* $Ar - COOH$ a partir de las bases $Ar - NH_2$.

Reacciones sin eliminación de nitrógeno. — *a*) Las **arilaminas** en medio ácido y los **fenoles** en medio alcalino se condensan con los diazoicos y dan lugar a derivados **azoicos.** Esta reacción se denomina **copulación,** y se efectúa en posición *para* con respecto a la función amina o fenol que reacciona. Si la posición *para* está ocupada, la copulación se realiza en la posición *orto*. Jamás ocurre en la posición *meta*.

Damos a continuación dos ejemplos: la *anilina*, en medio ácido, forma un amino-azoico:



En medio alcalino, el diazotato reacciona con un *fenol*:



Se obtiene un hidroxiazoico.

Todos estos compuestos manifiestan propiedades *tintóreas*. Se preparan en gran número, sobre todo en la serie del naftaleno. Constituyen la clase de los **colorantes azoicos,** que representa una producción de 50% de todos los productos de síntesis.

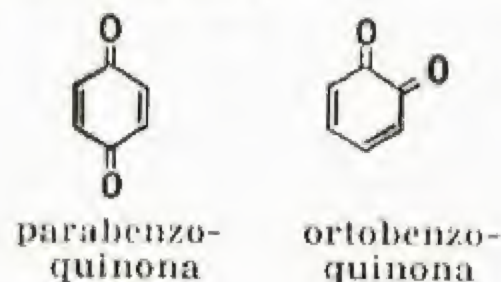
b) El cloruro de fenildiazonio puede ser *reducido sin eliminación de nitrógeno*. Se obtiene así la **fenilhidrazina**

$$C_6H_5 - N^+ \equiv N\ Cl^- + 2H_2 \longrightarrow C_6H_5 - NH - NH_2 + HCl,$$

que reacciona con los aldehídos y las cetonas, da compuestos cristalinos (v. p. 326) y sirve para preparar la antipiridina (v. p. 340).

Quinonas

Generalidades. — Las quinonas se forman en numerosas reacciones de oxidación. Se dividen en dos clases: las **paraquinonas** (las más importantes) y las **ortoquinonas.**



parabenzoquinona — ortobenzoquinona

El núcleo quinónico contiene solamente dos enlaces dobles. Estos cuerpos son oxidantes: tienden a reducirse a los difenoles correspondientes (hidroquinona y pirocatecol), de manera que el núcleo adquiere la estructura bencénica.

Las materias colorantes presentan en su molécula un núcleo de estructura quinónica (v. p. 340).

La *parabenzoquinona* se forma en la oxidación del ácido quínico, derivado de la quinina. Se obtiene oxidando la anilina con la mezcla crómica. Es un sólido amarillo, muy volátil; huele a cloro.

Funciones de las cadenas laterales

Generalidades. — En los compuestos bencénicos, las funciones ligadas en las *cadenas laterales* poseen sus propiedades habituales. Hay que hacer constar, sin embargo, que el núcleo ejerce cierta influencia sobre el primer átomo de carbono de una cadena. Por consiguiente, las funciones aldehído, cetona y ácido, *ligadas directamente al núcleo*, manifiestan ciertas particularidades en sus propiedades.

Todos los compuestos de este grupo son insolubles o poco solubles en el agua.

Derivados halogenados

Los derivados **bencílicos** son los más importantes. La cloruración del *tolueno* a ebullición y en ausencia de catalizadores se efectúa en la cadena. Se obtiene así el **cloruro de bencilo,** $C_6H_5 - CH_2Cl$, que es un líquido cuyos vapores irritan los ojos, aunque menos que el **bromuro de bencilo,** $C_6H_5 - CH_2Br$, que puede ser utilizado como lacrimógeno.

La cloruración más completa del tolueno conduce al **cloruro de bencilideno,** $C_6H_5 - CHCl_2$, y al **fenilcloroformo,** $C_6H_5 - CCl_3$.

Observación. No hay que confundir el radical **bencilo** $C_6H_5 - CH_2$—, cuya valencia disponible se encuentra en la cadena lateral, con el fenilo o los toluilos, cuya valencia libre radica en el núcleo.

Alcoholes

El **alcohol bencílico,** $C_6H_5 - CH_2OH$, es un líquido de olor suave, que hierve a 206° C, obtenido por hidrólisis en autoclave del cloruro de bencilo en presencia de óxido de plomo. Se utiliza en perfumería: el *acetato de bencilo* posee olor a jazmín y constituye el compuesto principal de la esencia de esta flor.

El **alcohol feniletílico,** $C_6H_5 - CH_2 - CH_2OH$, posee olor de rosa. Se obtiene por reducción del *fenilacetato de etilo* con sodio y alcohol. (V. más adelante.)

Aldehídos

Aldehído benzoico. — El aldehído benzoico, o benzaldehído, $C_6H_5 - CHO$, es el primer término, y por consiguiente el más simple, de los de la serie; la función aldehído está ligada directamente al núcleo.

Es un líquido que hierve a 180° C, y forma el principal constituyente de la esencia de almendras amargas, a la que confiere su aroma.

Se prepara industrialmente por oxidación catalítica del toluol:



$$C_6H_5 - CH_3 + O_2 \rightarrow C_6H_5 - CHO + H_2O.$$

El aldehído benzoico es utilizado en perfumería. Por otra parte, ofrece gran interés en síntesis orgánica.

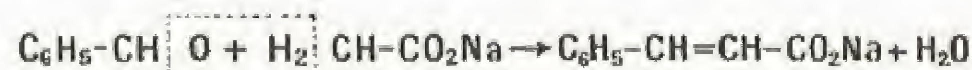
Propiedades químicas del aldehído benzoico. — Además de las propiedades habituales (poder reductor, formación de combinación bisulfítica, de oxima, etc.), la función aldehído ligada al núcleo bencénico puede dar lugar a reacciones de gran interés, entre las cuales citaremos:

a) *La oxidación-reducción.* Los **álcalis** reaccionan con **dos** moléculas *de aldehído benzoico:* una de ellas se oxida en **ácido benzoico,** la otra se reduce a **alcohol bencílico:**



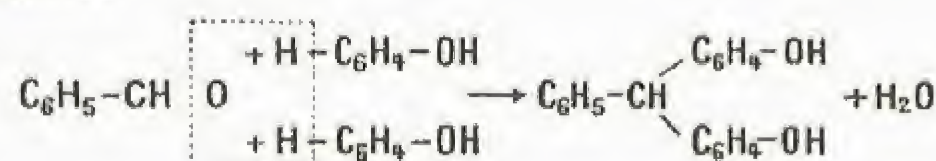
$$C_6H_5 - CHO \; OCH - C_6H_5 \rightarrow C_6H_5 - CH_2OH + C_6H_5 - CO_2H;$$
$$+ H_2 = O$$

b) *Las condensaciones bimoleculares.* Una molécula de agua se elimina entre dos moléculas reaccionantes. Citemos la reacción de condensación con los ácidos (o aún mejor con las sales sódicas), que conduce a los **ácidos etilénicos.** Este método sirve para preparar el **ácido cinámico:**



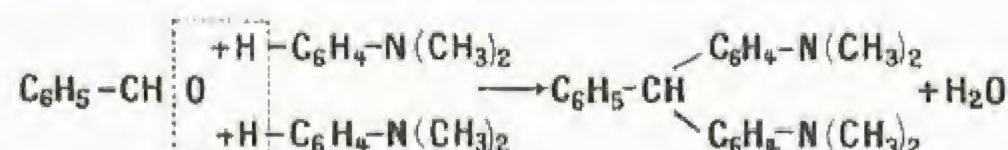
$$C_6H_5-CH\,O + H_2\,CH-CO_2Na \rightarrow C_6H_5-CH=CH-CO_2Na + H_2O$$

c) *Las condensaciones trimoleculares.* El aldehído benzoico se condensa con los *fenoles* y las *arilaminas* **terciarias.** Una molécula de agua se elimina entre el oxígeno aldehídico, y dos átomos de hidrógeno son retenidos en posición *para* en dos núcleos de fenol o de base. El fenol da la reacción:



$$C_6H_5-CH\,O \begin{matrix} +H-C_6H_4-OH \\ +H-C_6H_4-OH \end{matrix} \longrightarrow C_6H_5-CH\begin{matrix} C_6H_4-OH \\ C_6H_4-OH \end{matrix} + H_2O$$

La fenilamina se condensa de la misma manera:



$$C_6H_5-CH\,O \begin{matrix} +H-C_6H_4-N(CH_3)_2 \\ +H-C_6H_4-N(CH_3)_2 \end{matrix} \longrightarrow C_6H_5-CH\begin{matrix} C_6H_4-N(CH_3)_2 \\ C_6H_4-N(CH_3)_2 \end{matrix} + H_2O$$

Estos productos de condensación son otros tantos derivados del hidrocarburo llamado **trifenilmetano** $(C_6H_5)_3C - H$. Dan lugar, por oxidación, a la formación de colorantes (v. p. 340).

Observación. — La **anilina** se condensa con el benzaldehído; la reacción se realiza *mediante la función amina* y no por el hidrógeno del núcleo. El derivado así obtenido se conoce con el nombre de base de Schiff:



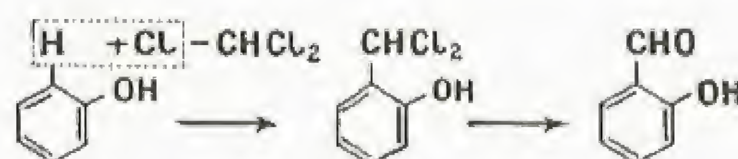
$$C_6H_5-CH\,O + H_2\,N-C_6H_5 \longrightarrow C_6H_5-CH=N-C_6H_5 + H_2O$$

Otros aldehídos. — El **paraisopropilbenzaldehído,** $(CH_3)_2 - CH - C_6H_4 - CHO$, comunica su aroma a los granos de comino. El **aldehído fenilacético,** $C_6H_5 - CH_2 - CHO$, se obtiene sintéticamente a partir del benzaldehído. Es la base del jacinto artificial. El **aldehído cinámico,** $C_6H_5 - CH = CH - CHO$, no saturado, es el principal constituyente de la esencia de canela.

Aldehídos fenoles

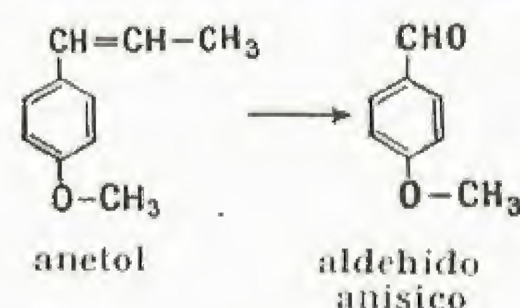
Ciertos **aldehídos fenoles** ofrecen un gran interés en perfumería. Estos cuerpos son constituyentes de ciertas esencias naturales; sin embargo, resulta generalmente más ventajoso prepararlos artificialmente. Citaremos, entre los métodos empleados para obtenerlos:

a) *La condensación del cloroformo con los fenoles*, que, en presencia de sosa cáustica, transforma el **fenol** en **aldehído salicílico** (u ortohidroxibenzoico).



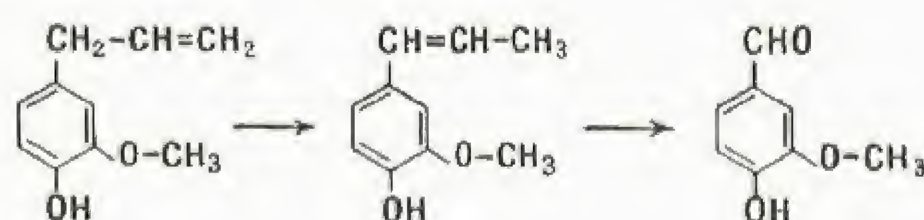
(Se puede admitir la formación transitoria, como compuesto intermedio, del derivado diclorado aldehídico, que se hidroliza fácilmente por reacción con el álcali; se obtiene, al mismo tiempo, cierta cantidad del isómero *para*).

b) *La oxidación de los compuestos fenólicos con cadena lateral etilénica.* El **anetol** de la esencia de anís conduce al **aldehído anísico.**



anetol — aldehído anísico

El **eugenol,** extraído de la esencia de *clavo*, se isomeriza en isoeugenol, que, por oxidación, se transforma en vainillina, principio aromático de la vainilla.



Cetonas

La **acetofenona,** $C_6H_5 - CO - CH_3$, que funde a 20° C y hierve a 202° C, se obtiene fácilmente condensando el cloruro de acetilo con benceno, en presencia de cloruro de aluminio anhidro (v. p. 333). Manifiesta propiedades hipnóticas (lo que le ha valido el ser denominada "hipnona"), y es empleada también en perfumería.

Ácidos

El **ácido benzoico,** $C_6H_5 - COOH$, existe en estado libre en la esencia de *benjuí*. Se prepara oxidando el toluol.

Es un sólido blanco, que funde a 121° C, poco soluble en el agua fría, más soluble, al igual que todos los ácidos aromáticos, en el agua hirviendo. Sus homólogos pueden ser obtenidos por diversos métodos sintéticos, en especial a partir de las arilaminas, que se transforman primeramente en sales de diazoico, y finalmente en nitrilos (v. p. 337).

Propiedades. — El ácido benzoico, cuya función está ligada al núcleo, posee, así como sus homólogos, la propiedad de perder fácilmente una molécula de anhídrido carbónico, con lo que se transforma en hidrocarburo:



$$C_6H_5 - COO - H \rightarrow C_6H_5 - H + CO_2.$$

La condensación del ácido benzoico conduce a la formación de *antraquinona* (v. p. 339).

Otros ácidos. — El **ácido fenilacético,** $C_6H_5 - CH_2 - COOH$, se obtiene fácilmente a partir de su *nitrilo* $C_6H_5 - CH_2 - C \equiv N$, que, a su vez, es preparado por el procedimiento clásico que consiste en hacer reaccionar el cianuro potásico con el cloruro de bencilo:



$$C_6H_5-CH_2-Cl + K-C \equiv N \longrightarrow C_6H_5-CH_2-C \equiv N + KCl$$

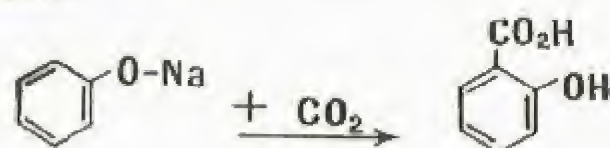
Su éster etílico sirve para preparar el alcohol feniletílico por hidrogenación.

El **ácido cinámico,** $C_6H_5 - CH = CH - COOH$, ácido etilénico obtenido a partir del aldehído benzoico (v. columna anterior), existe en diferentes esencias y en los bálsamos de Tolú y Perú.

Ácidos fenoles

Síntesis. — Los ácidos fenoles pueden obtenerse por condensación del *anhídrido carbónico* CO_2 con los *fenoles sodados*.

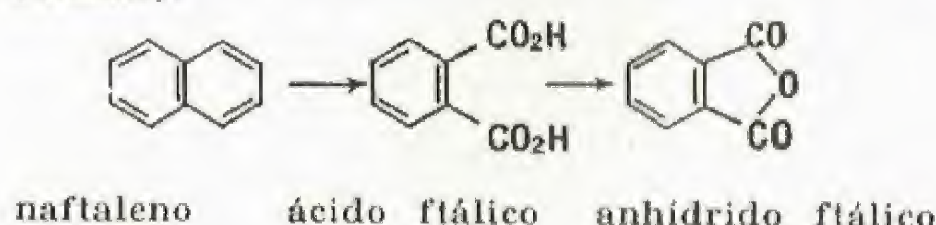
El *fenol* ordinario conduce, en estas condiciones, al **ácido salicílico** u ortohidroxibenzoico.



que funde a 115° C. Es antiséptico y constituye un remedio específico contra el reuma. Se emplea con profusión en farmacia en forma de sales o de ésteres. La *aspirina* es el derivado acetilado. El **ácido gálico** es un ácido con tres funciones fenol, obtenido por hidrólisis de ciertos taninos. Se emplea para la fabricación de tintas y de ciertos colorantes (antragalol). El calor lo descompone en pirogalol.

Diácidos

Acido ftálico. — El ácido ftálico es el diácido, en posición *orto*, derivado del benceno. Se prepara por oxidación del **naftaleno,** uno de cuyos núcleos se rompe. Da fácilmente un *anhídrido* (v. CONDENSACIONES, más adelante).



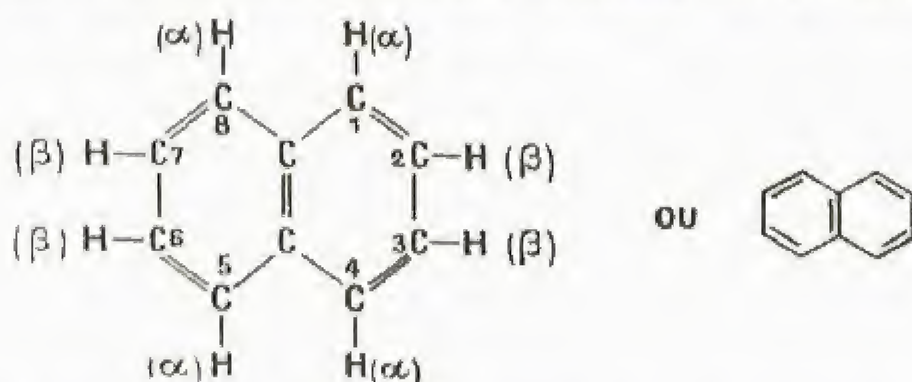
naftaleno ácido ftálico anhidrido ftálico

Núcleos complejos

Generalidades. — La mayor parte de los hidrocarburos con núcleos complejos existen en el alquitrán de hulla. Presentan, así como sus derivados, grandes analogías con los hidrocarburos y con los derivados bencénicos correspondientes. Describiremos rápidamente los grupos del **naftaleno** y el **antraceno.**

Grupo del naftaleno

Naftaleno. — El **naftaleno,** o *naftalina*, $C_{10}H_8$, presenta un núcleo formado por dos núcleos bencénicos reunidos. Es un sólido blanco



que funde a 80° C, muy sublimable. Tiene olor característico.

Se separa de los aceites de alquitrán que hierven entre 200° y 300° C, en el seno de los cuales cristaliza lentamente en frío.

El núcleo posee las propiedades generales del núcleo bencénico, pero es más sensible a la **oxidación:** los oxidantes transforman el naftaleno en ácido ortoftálico $C_6H_4\begin{smallmatrix}/COOH\\ \backslash COOH\end{smallmatrix}$.

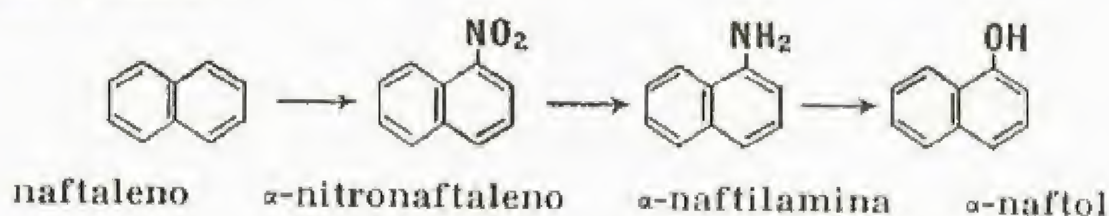
La **hidrogenación catalítica** provoca la fijación, por adición, ya de **cuatro,** ya de **diez** átomos de hidrógeno. Se obtienen así hidrocarburos líquidos: *tetralina* $C_{10}H_{12}$ y *decalina* $C_{10}H_{18}$, utilizados como carburantes, que se añaden a la gasolina corriente.

El naftaleno da fácilmente productos de **substitución.** Existen, para cada derivado monosubstituido, dos posiciones isómeras designadas por las letras α y β.

Si se numeran de 1 a 8 los átomos de carbono a los que va ligado un átomo de hidrógeno, la letra α designa las posiciones equivalentes 1, 4, 5 u 8, mientras que la posición β corresponde a una substitución en los carbonos 2, 3, 6 ó 7.

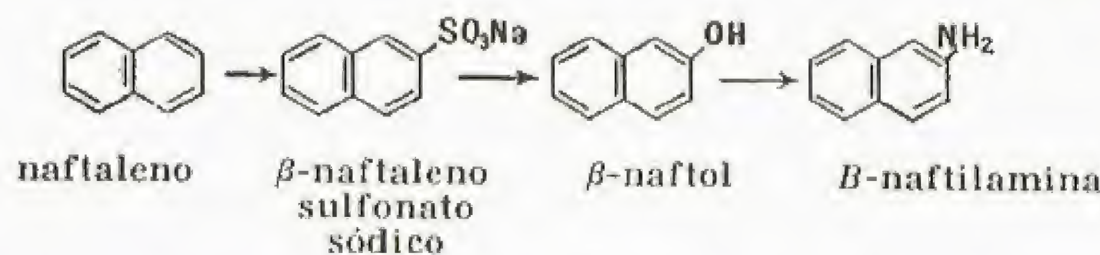
Naftoles y naftilaminas. — Los fenoles naftalénicos se denominan **naftoles,** y las aminas, **naftilaminas.** Estos cuerpos se obtienen de la manera siguiente:

a) El naftaleno se *nitra* exclusivamente en posición α. El *α-nitronaftaleno* conduce, por reducción, a la **α-naftilamina,** que puede ser transformada en **α-naftol** por calentamiento a 200° C en autoclave con ácido sulfúrico diluido:



naftaleno α-nitronaftaleno α-naftilamina α-naftol

b) El naftaleno se *sulfona* en β hacia 150° C, y el derivado **sulfonado** así obtenido se transforma en el **β-naftol** por fusión alcalina; este compuesto da lugar a la β-naftilamina por calentamiento en autoclave con amoníaco, en presencia de sulfito amónico.



naftaleno β-naftaleno sulfonato sódico β-naftol B-naftilamina

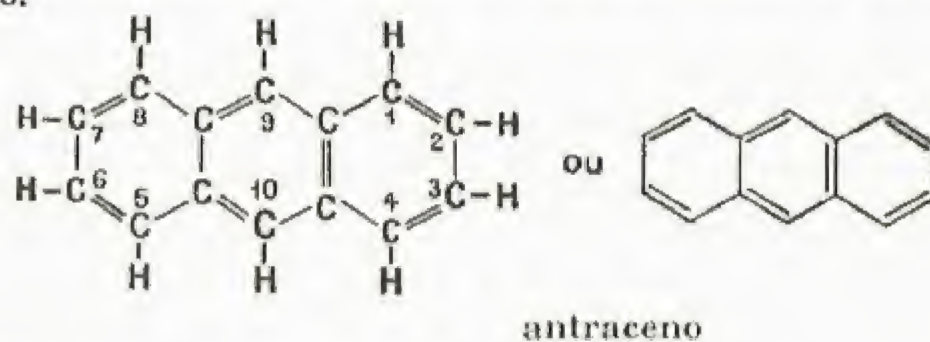
Se observará que la transformación de los fenoles en aminas se logra con mucha mayor facilidad que en la serie bencénica.

Los naftoles y las naftilaminas se presentan en estado sólido a la temperatura ambiente; pueden ser sulfonados. Los ácidos sulfónicos correspondientes sirven, al igual que otros varios derivados, para la fabricación de numerosos colorantes.

El β-naftol se emplea en forma de derivados (benzonaftol) como antiséptico interno. Sus éteres metílico, $C_{10}H_7 - O - CH_3$, y etílico, $C_{10}H_7 - O - C_2H_5$, son empleados en perfumería.

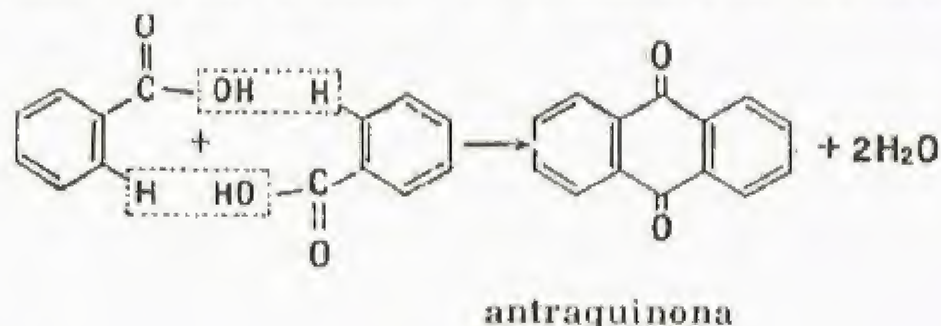
Grupo del antraceno

Antraceno. — El **antraceno,** $C_{14}H_{10}$, se separa por cristalización de los *aceites verdes* antracénicos, es decir, de la fracción de los alquitranes de hulla que destila entre 320° y 360° C. Es un sólido blanco que funde a 217° C y hierve a 351° C. Su molécula está formada por tres núcleos bencénicos reunidos. Se determina la posición de las substituciones numerando los diez átomos de carbono unidos a los átomos de hidrógeno.



antraceno

Antraquinona. — La **antraquinona,** $C_{10}H_8O_2$, se obtiene oxidando el antraceno con la mezcla crómica. Es un sólido amarillo que funde a 285° C y hierve a 382° C. Se puede preparar por síntesis, condensando dos moléculas de ácido benzoico, con eliminación de dos moléculas de agua:



antraquinona

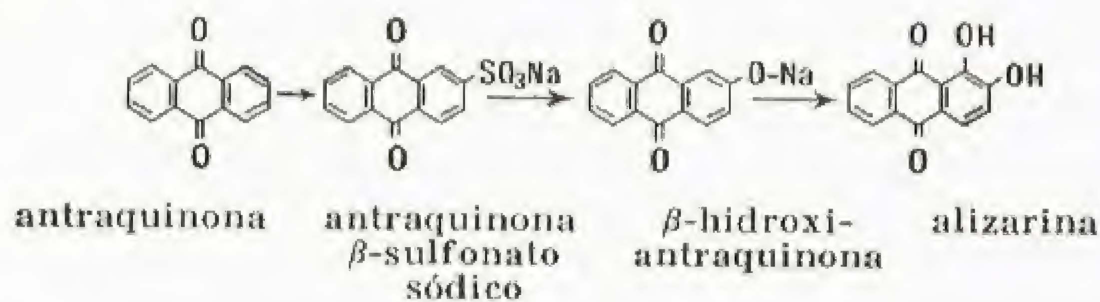
Los ocho átomos de carbono ligados a los hidrógenos presentan la misma disposición que en el naftaleno. Se numeran de la misma manera. Por consiguiente, se distinguen los derivados monosubstituidos α y β de la antraquinona.

Los derivados **fenólicos** de la antraquinona que contienen por lo menos dos **hidroxilos** ofrecen propiedades tintóreas. Se trata de las **hidroxiantraquinonas,** algunas de las cuales se cuentan entre los colorantes más importantes.

Estos cuerpos pueden formarse por oxidación directa, a temperatura adecuada, del núcleo del antraceno. Esta oxidación es facilitada cuando existe un hidroxilo en la molécula.

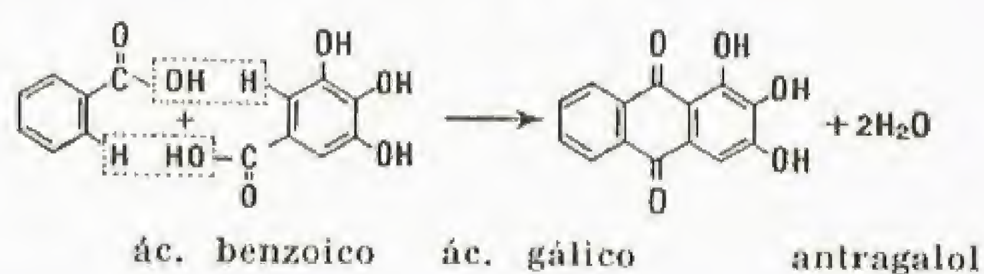
La **alizarina,** o **dihidroxi-1-2-antraquinona,** es el principio colorante de la *granza*. Se fabrica industrialmente:

Se sulfona en β la antraquinona y se somete el derivado así obtenido a la fusión alcalina. El monofenol que resulta se oxida durante la reacción por acción del oxígeno atmosférico y da el difenol (en forma de derivado sodado).



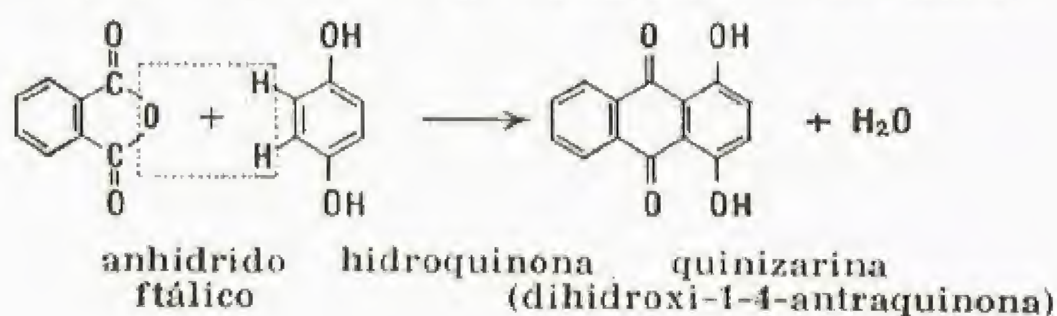
antraquinona antraquinona β-sulfonato sódico β-hidroxi-antraquinona alizarina

Las hidroxiantraquinonas pueden también originarse por condensación de los ácidos fenólicos entre sí o con el ácido benzoico:



ác. benzoico ác. gálico antragalol

e igualmente por condensación de los fenoles con anhídrido ftálico:



anhidrido ftálico hidroquinona quinizarina (dihidroxi-1-4-antraquinona)

Nociones someras sobre los colorantes

Constitución de los colorantes. — Ya hemos observado en el texto que precede la presencia de un núcleo **quinónico** en las moléculas de las *hidroxiantraquinonas* que son colorantes. Esta observación ha podido ser generalizada.

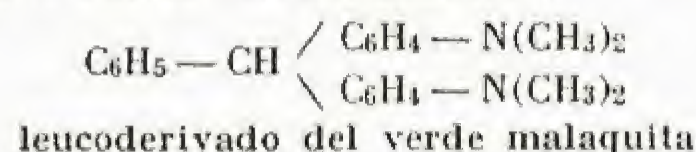
Este núcleo, llamado **cromógeno** o **cromóforo,** no basta para conferir propiedades tintóreas a la substancia considerada. En efecto, es preciso que la molécula posea, además, grupos fenólicos OH o aminógenos NH_2 para poder fijarse en las fibras textiles. Estos grupos se denominan **auxocromos.**

El número de substancias colorantes artificiales es considerable, pues las arilaminas y los fenoles que aportan los auxocromos pueden conducir a múltiples condensaciones y dar lugar, además, a la creación del núcleo quinónico.

Se utilizan sobre todo los derivados bencénicos y los derivados naftalénicos.

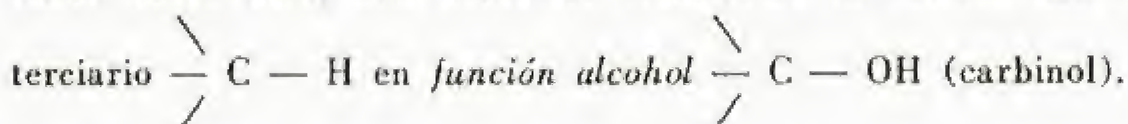
Indicamos a continuación unos cuantos ejemplos de estas reacciones, para hacer resaltar, sobre todo, la extraordinaria facultad de combinarse que manifiestan los cuerpos que encierran este núcleo.

Formación de colorantes derivados del trifenilmetano. — *Verde malaquita.* El **benzaldehído** se condensa con la **dimetilanilina** (v. p. 338) y da el derivado del trifenilmetano:



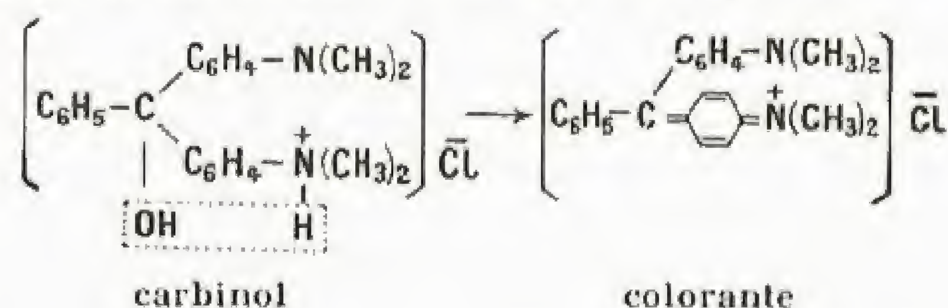
leucoderivado del verde malaquita

Este compuesto es incoloro bajo esta forma. Se le llama *leucoderivado.* Ahora bien, una oxidación transforma la función *hidrocarburo*



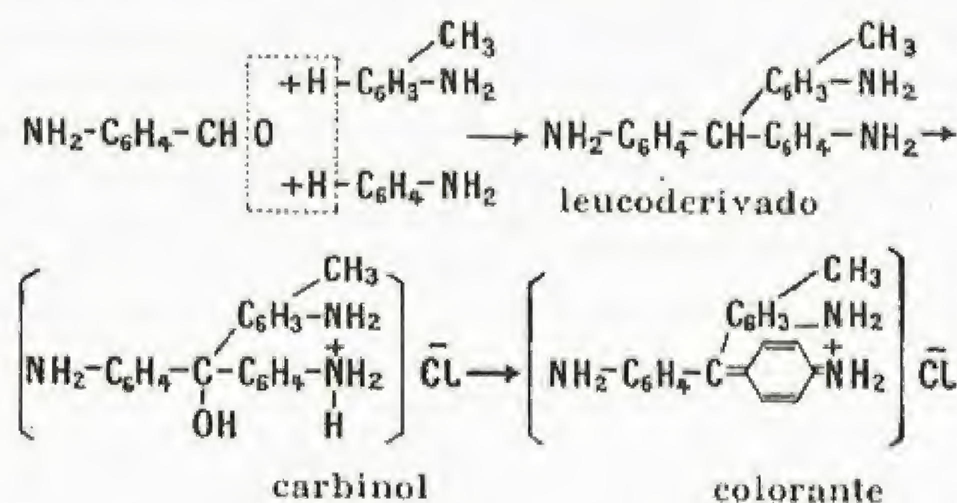
terciario — C — H en *función alcohol* — C — OH (carbinol).

En presencia de ácido clorhídrico, que salifica una función amina, se forma el *verde malaquita,* gracias a una eliminación de agua que permite el paso de uno de los núcleos a la forma quinónica.



carbinol — colorante

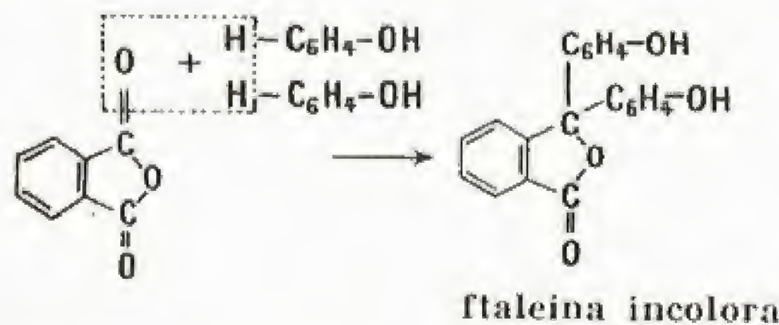
Fucsina. Se obtiene la fucsina oxidando la **paratoluidina** mezclada con **anilina** y **ortotoluidina.** Se puede admitir que la paratoluidina, $NH_2 - C_6H_4 - CH_3$, se transforma, en una fase intermedia, en el aldehído $NH_2 - C_6H_4 - CHO$. Se elimina una molécula de agua, de la que el oxígeno es suministrado por el aldehído, y los hidrógenos por las bases en posición *para.* Se obtienen así, sucesivamente, el leucoderivado, el carbinol y el colorante:



leucoderivado

carbinol — colorante

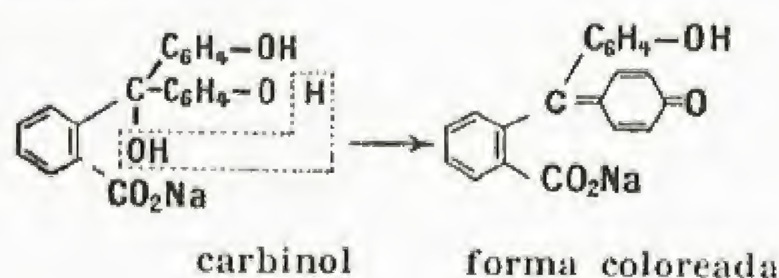
Fenolftaleína. Este compuesto, incoloro, se obtiene por reacción de una molécula de anhídrido ftálico con dos de fenol, con eliminación de una molécula de agua:



ftaleína incolora

Obsérvese la presencia en la molécula de un grupo — CO — O —, que corresponde al éster interno (lactona) de un ácido alcohol.

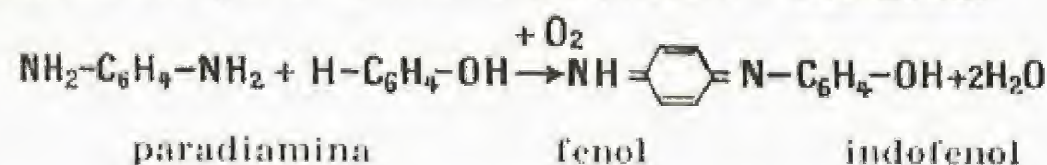
En medio alcalino, la saponificación se efectúa instantáneamente, y la ftaleína pasa a la forma coloreada de rojo por intermedio del carbinol, que se deshidrata:



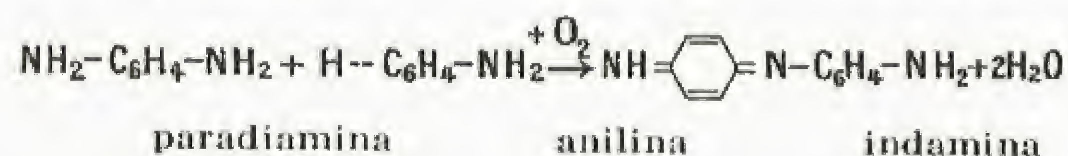
carbinol — forma coloreada

Esta reacción justifica su empleo como indicador coloreado.

Indofenoles e indaminas. — Cuando se oxida una paradiamina, de la que el tipo es la parafenilendiamina, $NH_2 - C_6H_4 - NH_2$, con un fenol o una amina, se obtienen derivados que contienen un núcleo quinónico a los que se denomina **indofenoles** e **indaminas.**



paradiamina — fenol — indofenol



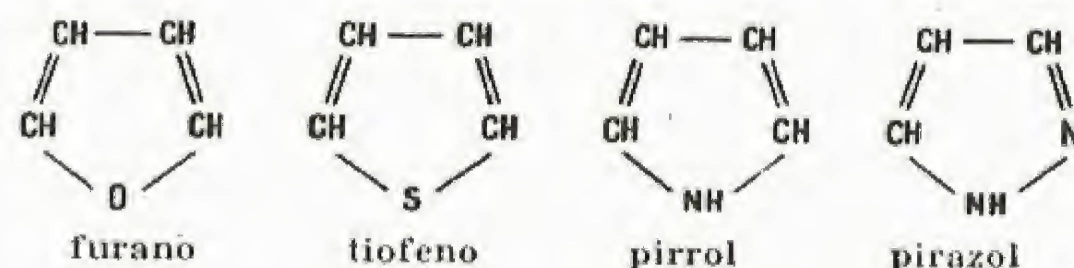
paradiamina — anilina — indamina

Estos cuerpos son colorantes, poco empleados como tales; sirven sobre todo como materias primas (en especial las indaminas) para obtener los derivados heterocíclicos, por cierre de un ciclo sobre *oxígeno, azufre* o *nitrógeno* (núcleos oxazólicos, tiazólicos, azólicos).

Serie heterocíclica

Generalidades. — Los heterociclos contienen, además del carbono, átomos de oxígeno, de azufre y de nitrógeno. Se clasifican en función del número de átomos que forman el anillo, independientemente de su naturaleza. Los ciclos pentagonales y hexagonales son los más corrientes. Se observa, igualmente, la existencia de ciclos complejos.

Ciclos pentagonales. — Los más interesantes son los siguientes:



furano — tiofeno — pirrol — pirazol

El ciclo del **furano** se origina en la deshidratación de los azúcares que contienen 5 átomos de carbono (aldopentosas), los cuales conducen a un aldehído derivado (furfurol).

El **tiofeno** se forma fácilmente por condensación del azufre con el acetileno; se encuentra, junto a sus homólogos, en el alquitrán de hulla. El benceno rectificado contiene siempre una proporción apreciable de este compuesto. Se extrae por agitación con ácido sulfúrico, en el que se disuelve, sulfonándose.

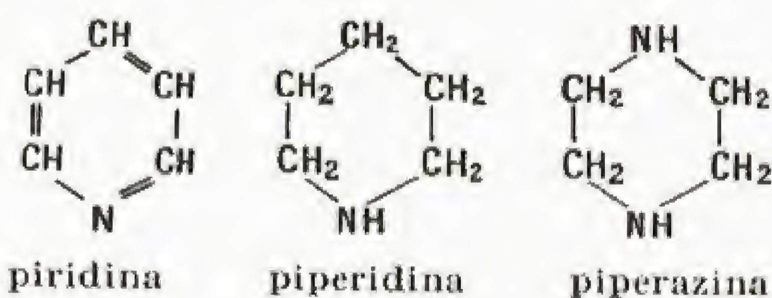
El **pirrol** se encuentra en el aceite procedente de la destilación de huesos (aceite de Dippel) y, en menor proporción, en el alquitrán de hulla. El nitrógeno del núcleo no es básico.

La *hemoglobina* de la sangre, la *clorofila* y los *pigmentos biliares* son otros tantos derivados del pirrol.

El anillo pirrólico se forma a partir de materias albuminosas y en el desdoblamiento de ciertos alcaloides.

El ciclo del **pirazol,** que contiene dos átomos de nitrógeno, está presente, en especial, en la *antipirina,* que es una cetona derivada (dimetilfenilpirazolona). El *piramidón,* otro analgésico, obtenido por síntesis, es muy semejante a la antipirina, de la que se diferencia por la presencia de una función amina terciaria.

Ciclos hexagonales. — La **piridina** se forma en la condensación del ácido cianhídrico y del acetileno. Su constitución recuerda la del



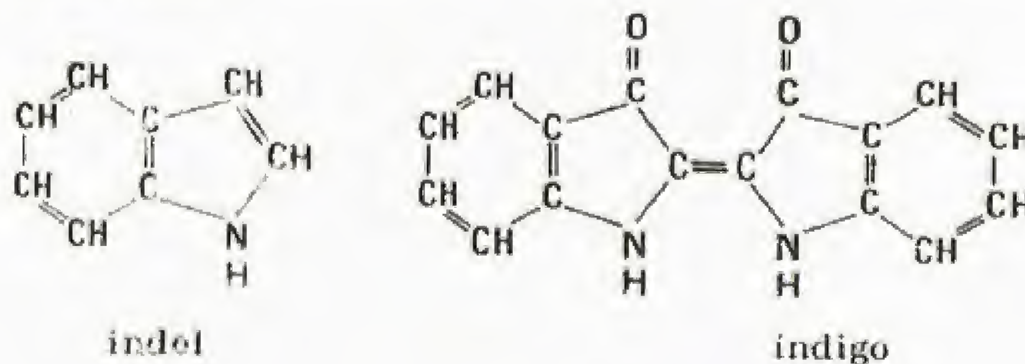
piridina — piperidina — piperazina

benceno; además, estos dos compuestos son igualmente estables. Es una base débil, de olor desagradable. Se encuentra en el alquitrán de hulla y en el aceite procedente de la destilación de huesos. El núcleo pirídico interviene en la constitución de varios alcaloides.

La **piperidina** existe, en forma de combinación, en la *piperina,* principio activo de la pimienta. Es la hexahidropiridina, y puede ser preparada por hidrogenación de esta base. Es más básica que la piridina.

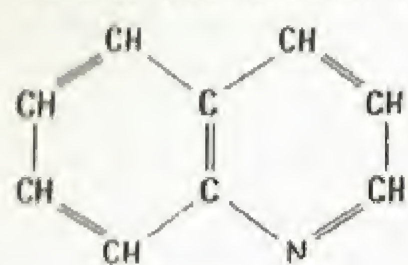
La **piperazina,** que posee dos átomos de nitrógeno en el ciclo, es un producto de síntesis preparado para usos farmacéuticos, como disolvente del ácido úrico.

Ciclos complejos. — El núcleo del **indol** está constituido por la unión de un núcleo bencénico con un núcleo pirrólico: se trata, pues, de un benzopirrol.



indol — indigo

El indol se encuentra en el azahar. Su olor pasa de repulsivo, cuando está concentrado, a agradable, si se diluye suficientemente.



quinoleína

Su homólogo superior, el *escatol*, está presente en las materias fecales.

El derivado más importante del grupo es el **índigo,** colorante natural que es preparado hoy en día exclusivamente por síntesis y cuya constitución recuerda la de las ortoquinonas. Es insoluble en el agua, pero se solubiliza por reducción de las funciones cetonas (índigo blanco). Para el teñido, el tejido, impregnado, se expone al aire. El índigo azul se solidifica en la fibra.

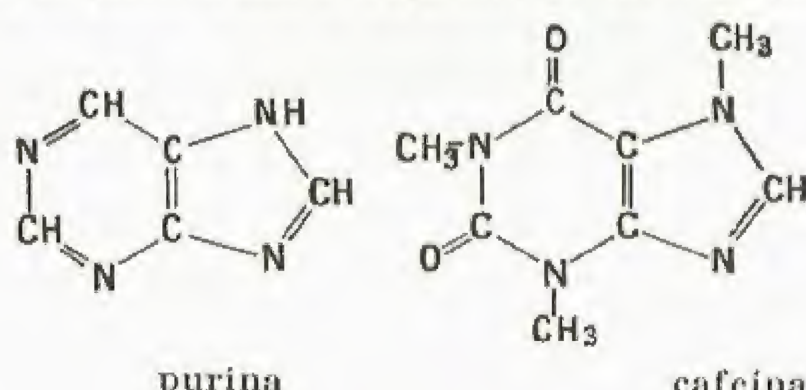
La **quinoleína** es una benzopiridina contenida principalmente en el aceite de huesos. Es una base débil. Se puede preparar por síntesis, calentando glicerol con anilina en presencia de un deshidratante (ácido sulfúrico) y de un oxidante (nitrobenzol).

En la **isoquinoleína,** el átomo de nitrógeno del ciclo se encuentra en posición β con respecto al núcleo bencénico.

Los ciclos complejos existen en la fórmula de ciertos colorantes. Hemos visto varios ejemplos en la página anterior.

Ureidos. — Ya hemos indicado (p. 329) que la urea puede dar con los ácidos unos compuestos llamados *ureidos*, que forman frecuentemente heterociclos.

Entre los ureidos complejos, citaremos la *cafeína* del café, la *teobromina* del cacao, la *teofilina* del te, el *ácido úrico*, la *guanina* del guano, etc., que poseen todos el esqueleto de una base llamada *purina*.



purina cafeína

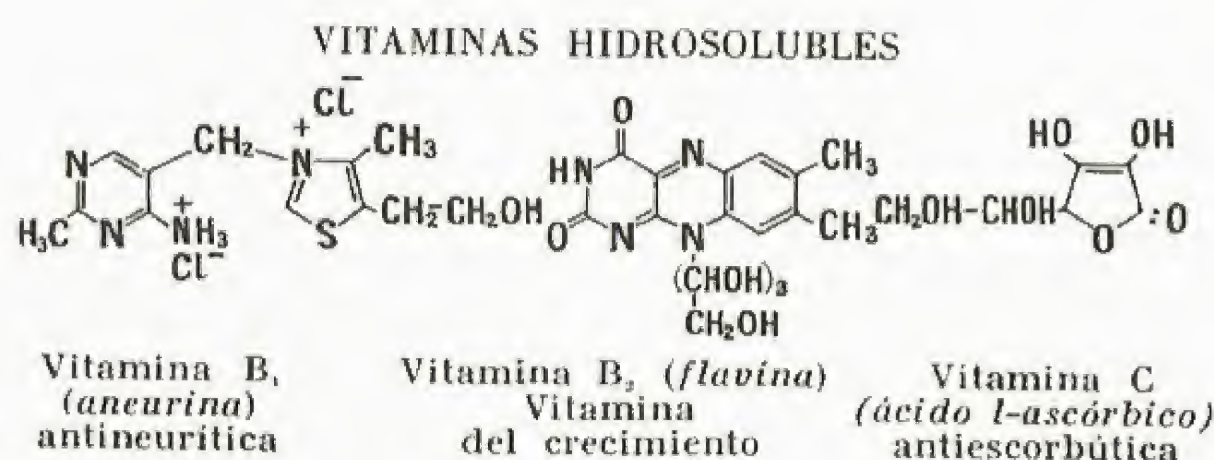
Alcaloides. — Se da el nombre de *alcaloides* a ciertas substancias naturales básicas que dan lugar a reacciones fisiológicas muy vivas. En general, se trata de venenos violentos. Su constitución, a veces muy compleja, los sitúa entre los compuestos heterocíclicos. Citemos la **nicotina** del tabaco, la **atropina** de la raíz de belladona, la **cocaína** de las hojas de coca, la **quinina** y la **cinconina** de la quina, la **morfina** y la **codeína** del opio, la **estricnina** y la **brucina** extraídas de la nuez vómica, etc.

Apéndice

Vitaminas. — Las **vitaminas** son unas substancias contenidas en proporciones ínfimas en los alimentos habituales de los animales, que deben ser ingeridas de manera incesante a fin de que se cumplan debidamente las funciones vitales. Su ausencia determina la aparición de trastornos diversos *(avitaminosis)* en el hombre. tales como escorbuto, raquitismo, etc. Las vitaminas se clasifican corrientemente por los efectos que producen.

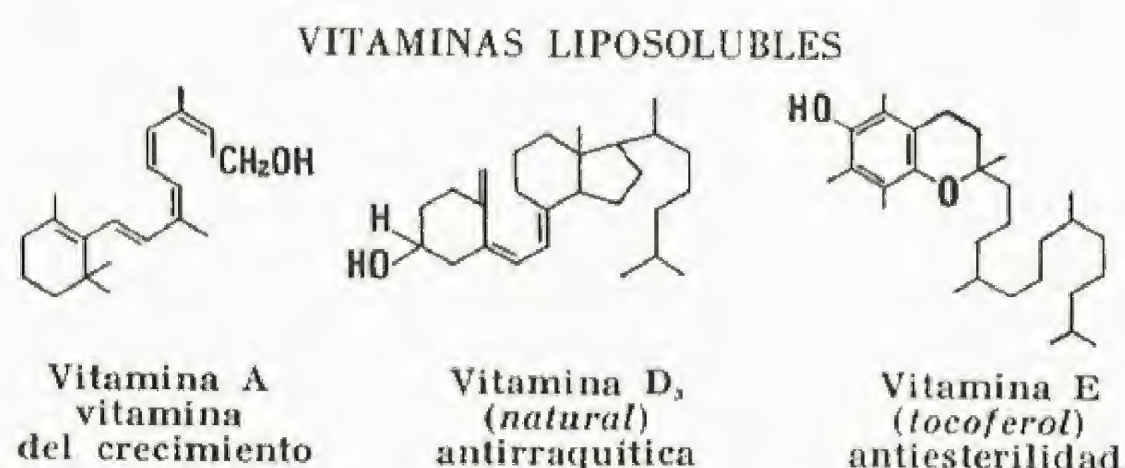
Desde el punto de vista de su constitución, las vitaminas forman parte de todas las series, como indica el cuadro siguiente (en el que figuran solamente las más importantes):

VITAMINAS HIDROSOLUBLES



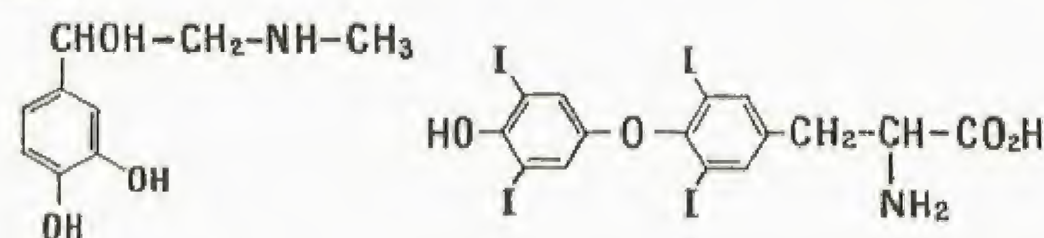
Vitamina B₁ (*aneurina*) antineurítica — Vitamina B₂ (*flavina*) Vitamina del crecimiento — Vitamina C (*ácido l-ascórbico*) antiescorbútica

VITAMINAS LIPOSOLUBLES



Vitamina A vitamina del crecimiento — Vitamina D₂ (*natural*) antirraquítica — Vitamina E (*tocoferol*) antiesterilidad

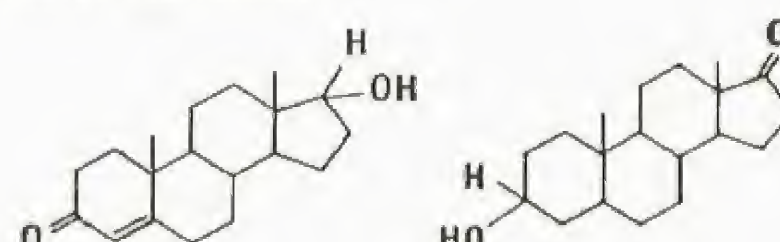
Hormonas. — Se llama así a las substancias segregadas por las glándulas *endocrinas*, que vierten directamente sus productos en la sangre. Estas substancias son activas a dosis generalmente muy pequeñas. La primera hormona aislada ha sido la *adrenalina*, principio activo de las cápsulas suprarrenales, que regula la dilatación y la constricción de los vasos capilares sanguíneos. La *tiroxina*, segregada por la glándula tiroides, regula el desarrollo físico e intelectual de los individuos.



adrenalina tiroxina

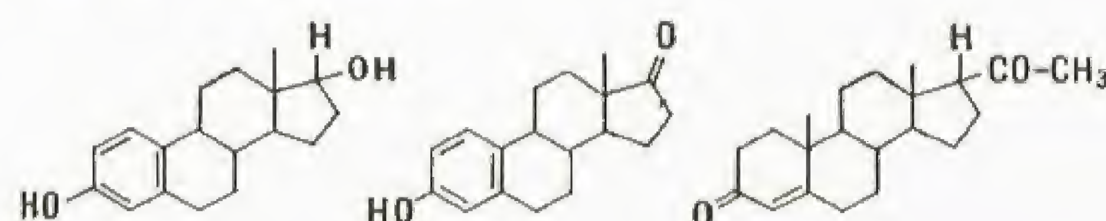
Uno de los grupos más importantes de las hormonas es el constituido por las *hormonas sexuales*, que pertenecen a los esteroides. Se distinguen:

1° *Las hormonas masculinas*



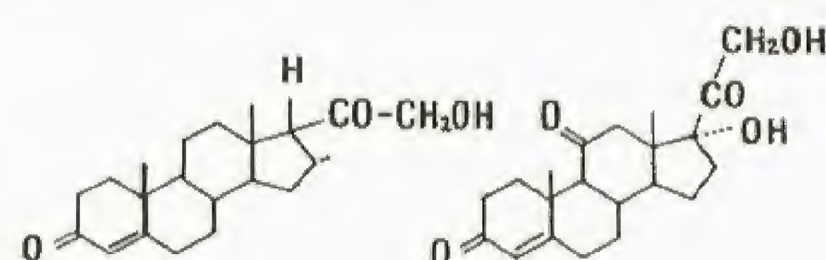
testosterona androsterona

2° *Las hormonas femeninas*



estradiol estrona progesterona

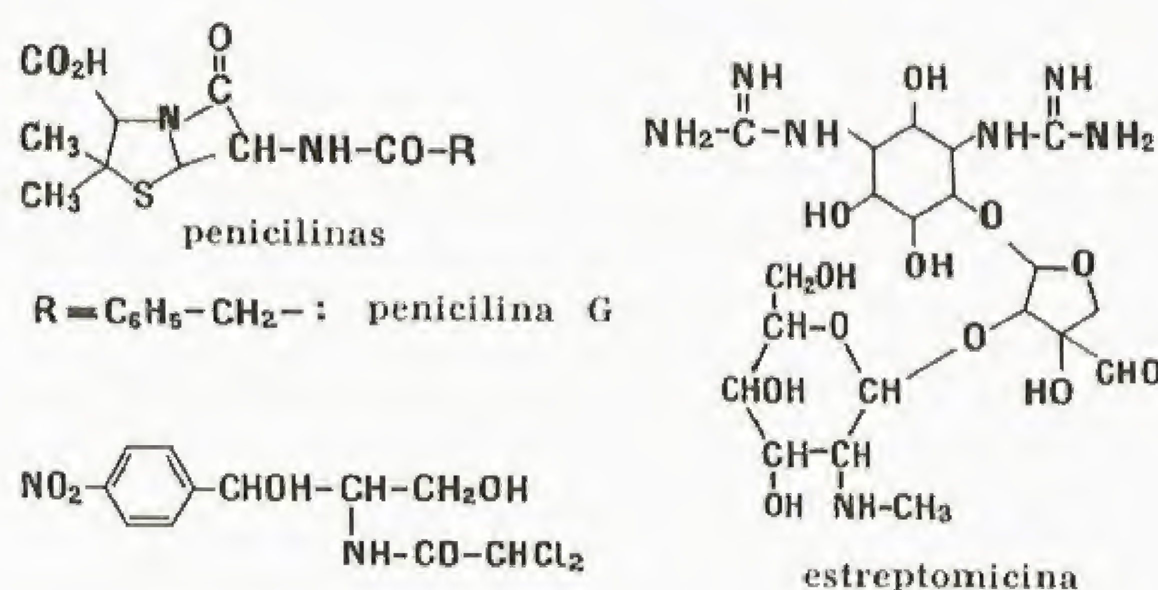
Pertenecen, igualmente, al grupo de los esteroides:



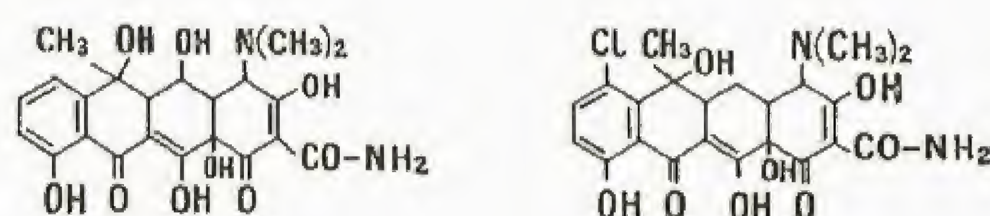
desoxicorticosterona cortisona

Antibióticos. — Se designan con este nombre ciertas substancias (la mayor parte de ellas segregadas por microorganismos) capaces de oponerse a la multiplicación de los microbios. Esta propiedad fue descubierta en las *sulfamidas* (derivados de la paraaminofenilsulfonilamida o *Septoplix*: $NH_2—C_6H_4—SO_2—NH_2$).

Se ha logrado aislar, desde hace ya muchos años, cierto número de antibióticos naturales, entre los que mencionaremos:

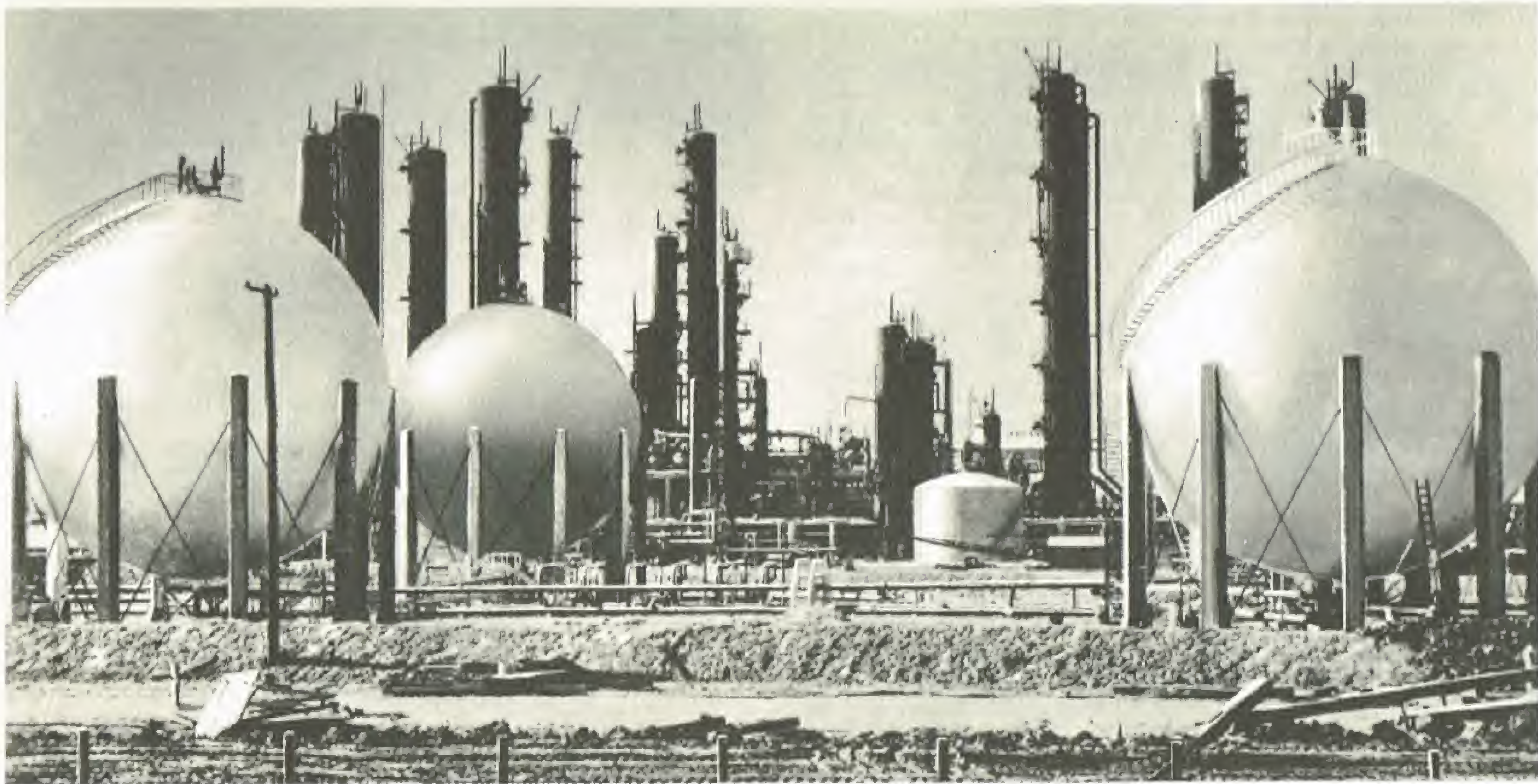


penicilinas — cloranfenicol — estreptomicina



terramicina aureomicina

R. Panico, J. Ricavdy y X. Martínez Garaygordóbil



Fábrica de caucho sintético en los Estados Unidos *(Fot. U. S. I. S.)*

Aplicaciones de la Química

Combustibles y carburantes

Definición. Clasificación y utilización de los combustibles. Poder calorífico. — **Combustibles sólidos naturales:** Carbones naturales. Madera. — **Combustibles sólidos artificiales:** Carbonización de la hulla a altas temperaturas. Coque. Carbonización a baja temperatura o semicarbonización. Semicoque. Carbón de madera. — **Combustibles líquidos:** Petróleo. Refinación del petróleo. Índice de octano de las gasolinas. Petróleos de síntesis. Procedimiento Bergius. Procedimiento Fischer Tropsch. Carburantes y combustibles líquidos diversos. — **Combustibles gaseosos:** Gas del alumbrado. Subproductos. Gases pobres. Gas natural. Butano y propano. Hidrógeno. Acetileno

Definición. — Los *combustibles* son cuerpos capaces de combinarse con el oxígeno con desprendimiento de calor. Los productos de la combustión son generalmente gaseosos. Por razones prácticas, la combustión no debe ser ni muy rápida ni demasiado lenta.

Puede hacerse una distinción entre los combustibles quemados en los hogares y los *carburantes* utilizados en los motores de explosión; aunque todos los carburantes pueden ser empleados como combustibles, no ocurre lo mismo a la inversa.

Clasificación y utilización de los combustibles. — Los distintos combustibles y carburantes utilizados pueden ser: sólidos, líquidos o gaseosos.

Los combustibles sólidos pueden quemarse en trozos o pulverizados. En el primer caso, la combustión se efectúa en rejillas, a través de las cuales se insufla el aire. En los grandes hogares industriales modernos se prefieren los combustibles sólidos pulverizados, que se inyectan junto con la corriente de aire necesaria para la combustión.

Los combustibles líquidos son pulverizados en forma de niebla o como una lluvia fina mediante aparatos especiales, llamados quemadores, de los cuales hay varios tipos. En todos estos quemadores circula una corriente de aire que, arrastrando las partículas líquidas, produce la combustión.

Los combustibles gaseosos son los más fáciles de utilizar, ya que los quemadores son simples sopletes.

Los hogares de combustibles líquidos o gaseosos permiten una regulación automática del calor más sencilla y exigen menos mano de obra que los hogares de combustibles sólidos. Éstos tienen, por otra parte, el inconveniente de producir cenizas, las cuales hay que eliminar.

Cualquiera que sea el combustible utilizado, interesa que la admisión del aire en el hogar o en los quemadores sea regulada convenientemente.

Si el aire es demasiado abundante, se enfría el hogar; si no es suficiente, una parte del combustible queda sin quemar y, en este caso, los humos que salen de la chimenea tienen un aspecto negruzco a causa de las partículas de carbono quemado. En los hogares de elevado rendimiento, el aire que alimenta la combustión se calienta por intercambio de calor con los gases que salen de las chimeneas.

Casi nunca se utiliza directamente el calor desprendido en la combustión, sino que se calienta un fluido (agua o vapor de agua), el cual trasmite su calor a los cuerpos que se van a calentar. De esta forma, se puede distribuir el calor por toda la fábrica a partir de un hogar único, con lo que disminuye el peligro de incendios.

Poder calorífico. — El poder calorífico es el número de calorías desprendidas por la combustión de un kilogramo de combustible, si se trata de un sólido o de un líquido, y de un metro cúbico, si se trata de un gas. El poder calorífico de los principales combustibles es, aproximadamente, el siguiente: mazut, 9 500; hulla, 6 000; gas del alumbrado, 3 000; madera, 3 000; gas pobre, de 1 200 a 1 000.

Combustibles sólidos naturales

Carbones naturales. — Los carbones naturales proceden de la transformación lenta, fuera del contacto con el aire, de grandes masas vegetales acumuladas en ciertas regiones durante las épocas geológicas. El proceso de carbonización es, en unos casos, muy antiguo, como en el de las antracitas, y en otros más reciente, como en el de las turbas. Influyen además otros factores, como las condiciones del medio ambiente y el tipo de vegetal original. Se han emitido numerosas teorías para explicar la formación de las minas de carbón, pero ninguna es totalmente satisfactoria.

Las antracitas, de formación muy antigua, contienen pocas materias volátiles (2 % o menos).

Las hullas magras y grasas tienen mayor cantidad de materias volátiles (hasta el 35 %).

Las antracitas son utilizadas sobre todo en los hogares domésticos, debido a que no ensucian las chimeneas. Las hullas se utilizan en los hogares industriales y en la fabricación del gas y el coque.

El carbón bruto extraído de la mina es sometido a separaciones y lavados, con el fin de eliminar las rocas incombustibles que lo acompañan. El contenido en cenizas es una característica importante de los carbones; en efecto, si superan el 30 %, el carbón casi no puede utilizarse.

En los lignitos, la transformación en carbón es menos completa. Los

lignitos no son interesantes como combustibles más que cuando su estracción puede realizarse a bajo precio, puesto que su poder calorífico es muy inferior a la de las hullas.

Las turbas, de formación más reciente, son sólo utilizadas como combustibles domésticos en los países pobres en combustibles. Es difícil su empleo en los hogares industriales, ya que deben ser previamente secadas, y esta desecación puede absorber cantidades importantes de combustible.

Madera. — La madera se utiliza sobre todo en la calefacción doméstica. En los hogares industriales, salvo en los países en que es muy abundante, no suele emplearse.

Combustibles sólidos artificiales

Carbonización de la hulla a altas temperaturas. Coque. — El coque se obtenía hasta hace poco por los métodos primitivos de los hornos de colmena o de coque metalúrgico, en los que no se recuperaban los subproductos. Actualmente, los hornos más empleados son los de recuperación de subproductos. Los gases que se escapan, muy ricos, son refrigerados y purificados, y se utilizan sea como gas de ciudad, para mover los motores de las coquerías o para calentar los hornos metalúrgicos; igualmente constituyen una importante fuente de hidrógeno para la síntesis del amoniaco.

El coque tiene la ventaja de no desprender más que una pequeña cantidad de materias volátiles y de no manchar las chimeneas.

El *coque de gas* del alumbrado es más ligero y más poroso que el *coque metalúrgico*, el cual debe poseer una resistencia mecánica suficiente para sostener el peso de la carga del alto horno. Una tonelada de hulla seca suministra 750 kilogramos de coque, 135 de hidrógeno, 20 de óxido de carbono, 75 de metano, 43 de alquitrán, 9 de benzol y 15 de sulfato amónico.

Carbonización a baja temperatura, o semicarbonización. Semicoque. — Destilando la hulla a temperatura poco elevada (500 ó 600° C), se obtiene un gran rendimiento en alquitrán y benzol, así como un residuo, el *semicoque*, muy poroso, que contiene todavía el 6 % de materias volátiles, lo cual lo hace muy inflamable.

La semicarbonización se emplea también para convertir los fragmentos finos de carbón en antracitas artificiales (carbolun, antracita). Los gases desprendidos, de alto poder calorífico (7 000 a 8 000 calorías por metro cúbico), se distribuyen a distancia mediante tuberías; constituyen también una importante fuente de hidrógeno.



Fig. 26. — Carbonización en el bosque

La destilación de una tonelada de hulla produce 630 kilogramos de semicoque, 81 litros de alquitrán, 12 litros de gasolina y un 4 a 6 % de gases.

Los alquitranes sometidos a destilación dan *fuel-oil* y *gas-oil* (ver más adelante). También se someten a procesos de hidrogenación (ver a continuación).

Carbón de madera. — Se obtiene, por destilación, de la madera (*fig.* 26). Así se recupera alcohol metílico, ácido acético, alquitrán, etc.

A partir del carbón de madera se fabrica el gas pobre, que substituye la gasolina en los automóviles (vehículos de gasógeno).

Combustibles líquidos

Los combustibles líquidos comprenden el petróleo y sus derivados (gasolina, queroseno y todos los aceites pesados), así como las gasolinas y los aceites procedentes de la destilación de los alquitranes, de la condensación de los gases, de la destilación de la hulla o del lignito, de la destilación de los esquistos bituminosos, los aceites vegetales, el alcohol, etc.

Algunos de ellos son empleados como combustibles; otros son utilizados como carburantes en los motores de explosión.

Petróleo. — El petróleo, que se encuentra en ciertas regiones del globo (Estados Unidos, Venezuela, U. R. S. S., etc.), en yacimientos subterráneos, se extrae haciendo perforaciones que pueden alcanzar los 7 000 m de profundidad. El petróleo bruto, que contiene agua y arena, es llevado a unos recipientes de decantación; si no se refina en el lugar de extracción, es transportado por medio de tuberías de acero estirado, de un diámetro interior de 5 a 35 centímetros, que son los llamados *oleoductos* o *pipelines*.

El petróleo bruto, líquido de aspecto muy variable, es una mezcla extremadamente compleja de numerosos hidrocarburos, con pequeñas cantidades de otras sustancias. Según su origen, predominan los hidrocarburos saturados C_nH_{2n+2} o los hidrocarburos cíclicos; pero en todos los petróleos los dos tipos de hidrocarburos existen en proporciones muy variables. La fórmula general es C_nH_p, variando la relación de *n* a *p* según su origen.

Refinación del petróleo. — La refinación del petróleo lleva consigo numerosas operaciones, de las cuales las principales son: las destilaciones, el *cracking*, el *reforming*, la refinación propiamente dicha y la adición de productos antidetonantes a las gasolinas.

En una operación preliminar, se eliminan del petróleo bruto los gases que lleva disueltos: metano, propano y butano. Después se realiza una primera destilación *(toping)*, la cual suministra:

La gasolina, que se destila entre 40 y 205° C, densidad 0,73;

El queroseno (petróleo lampante), que se destila hasta 325° C.

El residuo puede utilizarse directamente como combustible líquido (fuel-oil o mazut), o ser tratado para extraer aceites lubricantes, parafina o alquitranes, o también ser sometido a la operación de cracking.

Una segunda destilación permite obtener los siguientes subproductos:

El éter de petróleo, que se destila entre 40 y 60° C, densidad 0,65, y no se utiliza sino como disolvente;

La ligroina, que se destila entre 60 y 100° C, y se utiliza también como disolvente.

Otras fracciones tienen aplicaciones más o menos especializadas; la principal es el "white spirit", utilizado como sucedáneo de la esencia de trementina.

El cracking es una operación muy importante que tiene por objeto transformar en productos más volátiles, y principalmente en gasolina, el residuo de la primera destilación. Se comprende el interés económico de los procedimientos de cracking si se tiene en cuenta que las cantidades de gasolina en los petróleos brutos varían entre 4 y 30 %. Hay muchos procedimientos de cracking (Cross, Dubbs, Gyro, de Florez, Prat, y el catalítico de Houdry). Todos ellos se llevan a cabo en caliente (400 a 700° C), a presión (hasta 120 kg por cm²), y, en el procedimiento Houdry, con la ayuda de un catalizador. El rendimiento en gasolina puede llegar al 50 %, y a casi otro tanto de gas-oil (carburante para motores Diesel). La mitad de la gasolina que se consume en el mundo se obtiene por cracking.

El reforming es un tratamiento térmico de la gasolina, realizado a muy alta presión y durante un tiempo muy corto (10 a 20 segundos). Tiene por objeto aumentar el índice de octano (ver más adelante).

La refinación propiamente dicha consiste en eliminar de la gasolina, o de los otros derivados del petróleo, productos que si bien existen en cantidades pequeñas son muy molestos por sus propiedades físicas (olor) o químicas. Son, en particular, los productos sulfurados y ciertos compuestos etilénicos que forman gomas en las gasolinas.

Índice de octano de las gasolinas. — Cuando se aumenta el tipo de compresión en un motor de explosión, llega un momento en que la combustión de la gasolina no se hace de una manera ordenada, sino que adquiere un carácter explosivo. Este fenómeno se produce según si la compresión es más o menos elevada y según también la naturaleza de la gasolina. Una gasolina constituida sólo por heptano normal (C_7H_{16}) tiene una gran tendencia a "golpear" el motor. Por el contrario, el iso-octano puede soportar una tasa de compresión elevada. Por definición, el heptano normal tiene un índice de octano de 0, y el iso-octano un índice de 100. Una gasolina tendrá un índice de octano *x* como si fuese una mezcla *x* % de iso-octano con 100 — *x* % de heptano normal. Las gasolinas procedentes de la simple destilación de los petróleos brutos tienen índices que varían de 20 a 73. Las que son servidas en el mercado para los motores de automóvil tienen un valor superior a 60; los motores de aviación requieren una gasolina de 100 o más octanos.

Para aumentar el índice de octano de las gasolinas se recurre a tratamientos especiales (reforming, alcoholación, isomerización, aromatización), o a la adición de productos antidetonantes. El más utilizado es el plomo tetraetilo, Pb $(C_2H_5)_4$ (se añaden de 0,2 a 2 cm³ por litro). La misma cantidad de este producto añadida a un litro de gasolina origina un aumento del índice de octano que varía con la naturaleza de la gasolina.

Petróleos de síntesis. — A partir del carbón se han podido obtener mezclas de hidrocarburos semejantes a los petróleos naturales: son los llamados *petróleos sintéticos*. Existen dos procedimientos de importancia industrial: el procedimiento Bergius, que requiere grandes presiones, y el procedimiento Fischer Tropsch, en el que se trabaja a presión atmosférica o a presiones muy próximas a ella (5 kg por cm² como máximo).

Procedimiento Bergius. — Se mezcla carbón pulverizado con aceite pesado y una pequeña cantidad de sal de estaño como catalizador. Se calienta esta pulpa a unos 440° C en hidrógeno a gran presión. En esta primera operación se obtiene un aceite que, destilado por debajo de 170° C, da una gasolina ligera; de 170 a 320° C, un líquido que hay que volver a tratar, y, por encima de 320° C, un aceite pesado que se utiliza para la preparación de la pulpa inicial.

La fracción 170-320° C, hidrogenada de nuevo a mayor temperatura en presencia de sulfuros de molibdeno, se transforma en gasolina ligera con buen rendimiento.

Por tonelada de carbón se obtienen 525 kilogramos de aceite bruto, 265 de gases combustibles y 240 de coque; la destilación del aceite bruto origina 150 kilogramos de gasolina (aviación), 200 de carburante (motores Diesel), 60 de lubricante y 10 de residuos para calefacción.

Los alquitranes sometidos a esta hidrogenación dan muy buenos rendimientos en gasolinas.

Procedimiento Fischer Tropsch. — Este procedimiento emplea una mezcla de hidrógeno y óxido de carbono en una proporción aproximada de dos volúmenes de hidrógeno por uno de óxido de carbono. Esta mezcla se obtiene por gasificación (ver más adelante) del carbón, el metano o cualquier otro combustible calentado a 200° C sobre un catalizador de cobalto o níquel. Un metro cúbico de gas proporciona de 130 a 140 gramos de hidrocarburos líquidos, la mitad de los cuales pueden utilizarse como gasolina. El índice de octano es bajo (alrededor de 40). Por el contrario, las fracciones de punto de ebullición elevado constituyen un excelente carburante para los motores Diesel.

Carburantes y combustibles líquidos diversos. — Se han utilizado como carburantes distintos productos orgánicos líquidos, tales como el benzol bruto, procedente de la destilación de la hulla, los

alcoholes etílico y metílico, los aceites vegetales, etc. Pero no se trata más que de procedimientos circunstanciales empleados a consecuencia de la escasez de los combustibles líquidos normales.

Para la propulsión de cohetes se utilizan gasolinas especiales o productos tales como los alcoholes, el nitrometano, la monoetilanilina y la hidracina.

Combustibles gaseosos

Los principales combustibles gaseosos son los hidrocarburos gaseosos naturales (metano, butano) y los gases obtenidos artificialmente: acetileno, hidrógeno, gas del alumbrado, gas de hornos de coque, gas de agua, gas de gasógeno, gas de altos hornos, butano obtenido por cracking, etc.

Gas del alumbrado. — Éste es el primer combustible gaseoso conocido y, aún hoy, el más empleado.

En 1787, el ingeniero francés **Ph. Lebon** tuvo la idea de extraer un gas combustible por destilación de la madera o del carbón de madera. Sugirió también la posibilidad de destilar la hulla. El irlandés **Murdoch,** por la misma época, llegó a conclusiones análogas, pero fue el alemán **Winzler,** llamado **Winsor,** el primero que explotó este descubrimiento en Inglaterra.

Actualmente se destila la hulla (carbones grasos) en un recipiente cerrado, a una temperatura comprendida entre 1 100 y 1 200° C. Se utilizan hornos horizontales de tierra refractaria cargados mecánicamente y que funcionan durante ocho horas. También se emplean hornos verticales, en los cuales la entrada del carbón y la descarga del coque se efectúan de una forma continua, así como hornos con cámaras estrechas de fondo inclinado, calentadas por tubos, donde la destilación dura 24 horas. Estos aparatos son calentados con los gases de gasógenos obtenidos con un coque de más baja calidad.

El gas que se desprende es sometido a diversos tratamientos de depuración física (el alquitrán se deposita por enfriamiento, el amoniaco se disuelve en el agua) y química (el ácido sulfhídrico y los cianuros son retenidos en el óxido de hierro de los depuradores). Finalmente, se eliminan el naftaleno y el benzol.

El gas, listo para el consumo, se almacena en gasómetros y se distribuye por canalizaciones subterráneas.

Este gas contiene: 48 % de hidrógeno, 35 % de metano, 8 % de óxido de carbono, 4 % de hidrocarburos diversos (etileno, acetileno, vapores de benceno, naftaleno, etc.) y 5 % de otros gases (anhidrido carbónico, ácido sulfhídrico, etc.).

Subproductos. — El amoniaco se transforma en sulfato amónico y se vende como abono.

Los *alquitranes* (coaltar) son sometidos a un tratamiento a fin de separar los aceites ligeros, por debajo de 170° C (benzoles), y los aceites medios, de 170 a 240° C (fenoles y cresoles); los aceites pesados (240-270° C) y los aceites antracénicos (270-360° C) depositan el naftaleno, el antraceno, etc. El residuo que queda es la *brea* (asfalto de carretera).

A menudo se mezcla el gas de agua con el gas del alumbrado. En algunos países, estos gases son sustituidos por el *gas natural.*

Gases pobres. — Se obtienen sea de la gasificación de algunos combustibles, como subproductos de algunas operaciones químicas. El más importante de estos gases es el de altos hornos, que está formado por una mezcla de gas carbónico y óxido de carbono; su poder calorífico es bajo. Sólo se utiliza en el mismo sitio donde se produce.

La gasificación de los combustibles puede realizarse por combustión incompleta, por acción del vapor de agua o por un tratamiento combinado de esas dos operaciones. La combustión incompleta solamente suministra óxido de carbono, y algo de anhídrido carbónico y de nitrógeno si se emplea aire como carburante. Se puede elevar el poder calorífico de tal gas utilizando en la operación aire enriquecido con oxígeno u oxígeno puro. De esta forma se disminuye la proporción de nitrógeno en el gas.

La acción del vapor de agua sobre carbón incandescente da una mezcla de óxido de carbono e hidrógeno, según la reacción



$$C + H_2O \rightarrow CO + H_2.$$

Esta reacción absorbe calor y, para evitar que se interrumpa, es preciso alternar esa fase del proceso con otra basada en una reacción que desprenda calor, como la de la combustión incompleta del carbón con aire u oxígeno.

Se puede obtener una reacción análoga, en condiciones apropiadas, utilizando, en lugar de carbón (prácticamente se emplea el coque), gas natural o mazut.

Los gases así obtenidos no se utilizan como combustibles o como carburantes (vehículos de gasógeno) más que cuando su potencia calorífica es baja. En caso contrario, se emplean en síntesis químicas (véase Abonos), y también como gas doméstico, en lugar del gas del alumbrado.

Gas natural. — En el interior de la corteza terrestre existen bolsas que contienen cantidades importantes de gases combustibles cuyo origen es probablemente análogo al de los petróleos. La presión de estos gases suele ser elevada (varios centenares de atmósferas), lo cual permite su distribución económica a regiones extensas. Están constituidos principalmente por metano, con pequeñas cantidades de butano, y aun por hidrocarburos líquidos. Éstos, una vez extraídos, constituyen un buen manantial de gasolina.

Los gases naturales son utilizados como carburantes, o, después de un cracking en presencia de vapor de agua, para síntesis químicas.

Los yacimientos más importantes están en los Estados Unidos y en el norte de Italia. Francia explota con buen resultado el de Lacq.

Butano y propano. — El butano y el propano se extraen del petróleo bruto, en el que se encuentran disueltos. También se originan en las diversas operaciones del tratamiento de los petróleos. Son fácilmente licuables a una presión baja y pueden transportarse en estado líquido en recipientes metálicos ligeros. Son utilizados como gases domésticos en las regiones donde no existe distribución de gas del alumbrado. Como se necesita mayor cantidad de aire para quemar un volumen dado de butano o propano que para quemar el mismo volumen de gas del alumbrado, los quemadores utilizados son distintos de los empleados para el gas doméstico.

Hidrógeno. — El hidrógeno puro, generalmente producido por electrólisis del agua, no se utiliza como combustible más que en soldadura autógena y en la fabricación de piedras preciosas sintéticas. En este caso es irreemplazable: como no contiene carbono, no existe el peligro de que altere la transparencia de las piedras.

Acetileno. — El acetileno se obtiene por acción del agua sobre el carburo de calcio (v. Abonos). Da una llama muy caliente y muy brillante. Se emplea en soldadura y para el alumbrado; pero éstas son aplicaciones accesorias: el acetileno es, sobre todo, un intermediario importante en numerosas síntesis químicas industriales.

Industrias inorgánicas

Abonos

Definición y clasificación. — **Abonos nitrogenados:** *Fijación del nitrógeno del aire*: Síntesis del amoniaco. Obtención del nitrógeno. Obtención del hidrógeno. Transformación del amoniaco. Cianamida cálcica. Síntesis del ácido nítrico. Fabricación de la urea. — **Abonos fosfatados.** — **Abonos de potasa**

Definición y clasificación. — Los abonos son sustancias que se añaden a la tierra para ayudar al crecimiento y nutrición de las plantas. Suministran a la tierra elementos que no son renovados de forma natural, o lo son muy lentamente. El suelo se empobrecería, pues, si no se le proporcionaran artificialmente estos elementos, los cuales son tres: nitrógeno, fósforo y potasio; de ahí la clasificación de los abonos en abonos nitrogenados, fosfatados y de potasa.

La fabricación de abonos es de una trascendental importancia, ya que sin ellos los cultivos no podrían satisfacer las necesidades alimenticias de la humanidad.

Abonos nitrogenados

Existen abonos nitrogenados naturales, como el estiércol, los residuos orgánicos de toda especie y las mismas plantas (abonos verdes); otros son subproductos de la industria (residuos industriales), pero la mayor parte se fabrican industrialmente.

Para ser asimilado por las plantas, el nitrógeno debe, en principio, emplearse combinado, y ello sea de la manera que fuere. En la práctica, no se utilizan más que las sales de amonio, los nitratos, la cianamida (CN_2Ca) y, de una forma aún poco extendida, el amoniaco y la urea. Las fuentes que proporcionan el nitrógeno para su transformación en abonos son, por orden de importancia: la atmósfera (3 600 billones de toneladas), la hulla (30 000 millones de toneladas), los nitratos naturales (30 millones de toneladas). Hay que añadir que la primera de esas fuentes es inagotable, puesto que se renueva sin cesar.

Se utilizan tres procedimientos para fijar el nitrógeno del aire; el último apenas se emplea ya. El primero consiste en combinar el nitrógeno con el hidrógeno para obtener amoniaco; el segundo fija el nitrógeno en forma de cianamida por combinación con el carburo de

calcio, y el tercero consiste en provocar la formación de óxidos de nitrógeno por calefacción del aire a temperatura elevada.

Como ya se dijo anteriormente, en la destilación de la hulla se desprende el nitrógeno en forma de amoniaco (fabricación del coque y del gas del alumbrado). Este amoniaco se recupera en forma de sulfato haciendo pasar los gases desprendidos en la destilación por agua sulfúrica.

Los nitratos naturales, que son los nitratos de sosa, sólo existen en grandes yacimientos en Chile; son transformados en nitrato cálcico para utilizarlos como abonos.

Fijación del nitrógeno del aire

Síntesis del amoniaco. — Mezclando un volumen de nitrógeno con tres volúmenes de hidrógeno, en presencia de catalizadores apropiados, presiones de 200 a 1 000 kilogramos por cm^2 y temperaturas de 200 a 500° C, se obtiene la reacción



$$N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3.$$

Es preciso que el nitrógeno e hidrógeno utilizados sean muy puros, pues de otro modo las impurezas neutralizarían la acción del catalizador e impedirían la reacción. El problema principal de la industria de la síntesis del amoniaco consiste, pues, en producir hidrógeno y nitrógeno puros y a poco precio.

Obtención del nitrógeno. — El nitrógeno se extrae del aire, en la mayor parte de los casos, durante la fabricación del hidrógeno (ver más adelante). Sin embargo, cuando se dispone de hidrógeno puro, o para ajustar la mezcla nitrógeno-hidrógeno a la proporción exacta, se obtiene el nitrógeno puro por licuefacción y destilación del aire.

Obtención del hidrógeno. — El hidrógeno puede ser obtenido en estado de gran pureza por electrólisis del agua. Pero este método sólo es posible en el caso, bastante raro, en que se disponga de corriente eléctrica a precio muy reducido. Un procedimiento más usual consiste en extraer el hidrógeno de algunos gases industriales (gases de hornos de coque, por ejemplo), mediante la licuefacción de los otros constituyentes. Pero el procedimiento más empleado consiste en gasificar un combustible (ordinariamente el coque) por la acción del aire y del vapor de agua.

Así se obtiene una mezcla que contiene anhídrido carbónico, nitrógeno, hidrógeno, óxido de carbono y pequeñas cantidades de metano y productos sulfurados. Éstos deben ser eliminados cuidadosamente. Para ello, el gas se pasa a través de substancias que fijan el azufre en estado de sulfuros. Seguidamente se obtiene el hidrógeno tratando el óxido de carbono con el vapor de agua según la siguiente reacción:



$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2.$$

El metano es igualmente transformado en hidrógeno y en gas carbónico:



$$CH_4 + O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2.$$

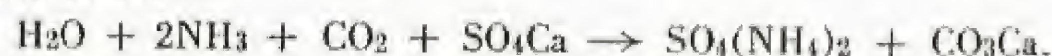
Se obtiene, pues, una mezcla de nitrógeno, hidrógeno y gas carbónico, con vestigios de óxido de carbono. El gas carbónico se elimina disolviéndolo a presión (30 atmósferas) en agua, y lavando a continuación el gas en una disolución de sosa. Como hay que eliminar también los vestigios de óxido de carbono, se lava el gas en una solución de sales cuprosas, que fija ese éxido. Para mayor seguridad, suele hacerse pasar la mezcla gaseosa por un catalizador que transforma los últimos vestigios del óxido de carbono en metano, gas que es mucho menos perjudicial para el catalizador empleado en la síntesis de amoniaco.

Finalmente, el gas contiene sólo nitrógeno e hidrógeno. La proporción de esos dos gases debe ser un volumen de nitrógeno, o menos, por cada tres volúmenes de hidrógeno. Si hace falta añadir un poco más de nitrógeno, éste puede obtenerse fácilmente en una instalación de licuefacción y destilación del aire.

La mezcla gaseosa se comprime entonces a varios centenares de atmósferas y se envía a los hornos de catálisis, cuya temperatura debe ser de unos 500° C. El catalizador es a base de platino. Una parte de la mezcla gaseosa se transforma en amoniaco, el cual se licúa y es extraído. El gas restante se vuelve a introducir en el horno junto con gas nuevo.

Transformación del amoniaco. — El amoniaco licuado se puede utilizar como abono directamente, inyectándolo en la tierra, pero esto suele hacerse en raras ocasiones. Generalmente, el amoniaco debe ser transformado antes de emplearse como abono. Las formas más corrientes de abonos así obtenidos son el sulfato amónico, el nitrato amónico y el nitrato cálcico amoniacal.

El sulfato amónico se obtiene por acción sobre el amoniaco de una papilla de yeso, a la cual se añade anhídrido carbónico. Se forma entonces carbonato cálcico insoluble, que se separa por filtración, y sulfato amónico soluble.



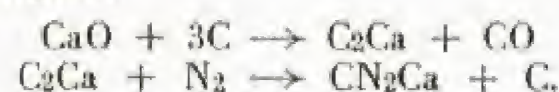
$$H_2O + 2NH_3 + CO_2 + SO_4Ca \rightarrow SO_4(NH_4)_2 + CO_3Ca.$$

Para fabricar los nitratos hay que oxidar el amoniaco en ácido nítrico. Esto se realiza por medio de oxígeno o aire, en presencia de una malla de platino como catalizador. Se forman vapores nitrosos que, por disolución en agua, dan ácido nítrico. Éste da con caliza nitrato de cal, que se utiliza en esta forma o mezclándolo con nitrato amónico.

Cianamida cálcica. — La cianamida cálcica se obtiene por fijación del nitrógeno puro, obtenido por destilación del aire líquido, sobre el carburo cálcico finamente pulverizado, a una temperatura de 800-1 000° C.

El carburo cálcico, materia prima para la fabricación del acetileno, se obtiene por calentamiento de la cal viva y carbón coque a gran temperatura (horno eléctrico).

Las dos fases de obtención de la cianamida pueden resumirse en las dos reacciones siguientes:



$$CaO + 3C \rightarrow C_2Ca + CO$$
$$C_2Ca + N_2 \rightarrow CN_2Ca + C.$$

La cianamida cálcica puede utilizarse directamente como abono; con agua, se transforma en amoniaco y en carbonato cálcico:

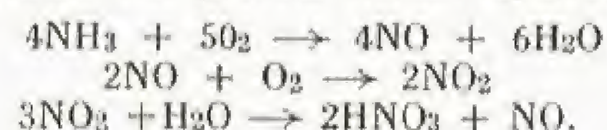


$$CN_2Ca + 3H_2O \rightarrow 2NH_3 + CO_3Ca.$$

También se puede fabricar el amoniaco por acción del agua a presión sobre la cianamida.

Síntesis del ácido nítrico. — El método primitivo de obtención del ácido nítrico consistía en combinar nitrato sódico (salitre) y ácido sulfúrico. Actualmente, sólo se emplea para obtener ácido nítrico a 100%. En los primeros años del presente siglo se desarrolló el método de síntesis directa a partir del nitrógeno y oxígeno del aire; se hacía saltar la chispa del arco eléctrico, y se formaban óxidos de nitrógeno, que finalmente pasaban a ser ácido nítrico. Este método se ha abandonado por la gran cantidad de energía que requería. Hoy, aproximadamente el 90% de la producción mundial se obtiene por el método de oxidación catalítica del amoniaco.

Se pasa aire, que contenga un 10% de su volumen compuesto de amoniaco, sobre un catalizador de platino a 1 000° C. La presión aplicada es la atmósfera, o ligeramente superior (7 atmósferas). Las *reacciones fundamentales de este proceso* son las siguientes:



$$4NH_3 + 5O_2 \rightarrow 4NO + 6H_2O$$
$$2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2$$
$$3NO_2 + H_2O \rightarrow 2HNO_3 + NO.$$

El aire mezclado con amoniaco se oxida en óxido nítrico, en el convertidor donde se encuentra la malla de platino a 1 000° C. La mezcla gaseosa se enfría rápidamente en unos cambiadores de calor (la segunda y tercera reacción se verifican mejor a baja temperatura) y se introduce después en una torre de absorción, refrigerada con agua, en cuya parte inferior se recoge al ácido nítrico al 61-65%.

El ácido nítrico concentrado (95-98%) no puede obtenerse por destilación, pues la mezcla de agua y ácido nítrico al 68% tiene el punto de ebullición constante. Para vencer esta dificultad se añade ácido nítrico de 64 a 66° Bé, que destruye la mezcla anterior, y destila así el ácido nítrico concentrado.

Actualmente se está ensayando en escala industrial un nuevo método para obtener este ácido calentando el aire, en hornos regenerativos, con gas natural, mazut u otros combustibles baratos.

Fabricación de la urea. — La urea se utiliza algunas veces como abono pulverizándola sobre las hojas de las plantas (abonos aéreos), pero su principal valor reside en que es una materia prima de capital importancia en la fabricación de algunas materias plásticas (v. FIBRAS ARTIF., p. 366). La urea se obtiene por acción del anhídrido carbónico sobre el amoniaco gaseoso; se forma así carbamato de amonio:



$$CO_2 + 2NH_3 \rightarrow O = C\begin{matrix}/NH_2\\ \backslash ONH_4\end{matrix}.$$

Este carbamato, por deshidratación, pasa a urea:



$$O = C\begin{matrix}/NH_2\\ \backslash NH_2\end{matrix}.$$

Abonos fosfatados

Los únicos manantiales importantes de fósforo son los yacimientos de fosfatos tricálcicos procedentes de la descomposición de los esqueletos de peces o de la acumulación de excrementos de aves marinas. Estos yacimientos son especialmente abundantes en Perú, Chile (guano) y África del Norte. El fosfato tricálcico, totalmente insoluble en el agua, no es asimilado por las plantas, salvo si se ha molido muy finamente. En la práctica, hay que transformar este fosfato tricálcico en fosfato bicálcico, que es ligeramente soluble. Esta transformación se hace mediante un ácido. El más empleado es el ácido sulfúrico.



$$(PO_4)_2Ca_3 + SO_4H_2 \rightarrow 2PO_4HCa + SO_4Ca.$$

La mezcla de fosfato bicálcico y sulfato cálcico se conoce con el nombre de *superfosfato*.

Para obtener productos de contenido más elevado en fósforo, que es el elemento activo, se tratan algunas veces las fosforitas con ácido fosfórico, obtenido a su vez por acción del ácido sulfúrico sobre el fosfato tricálcico. Por último, se consigue un abono a la vez nitrogenado y fosfatado por acción del ácido nítrico sobre los fosfatos.

Abonos de potasa

Estos abonos provienen, en su mayor parte, de yacimientos naturales de sales de potasio:

Silvina (cloruro de potasio);
Silvinita (cloruro de potasio y de sodio);
Carnalita (cloruro de magnesio y de potasio).

Estos yacimientos se han formado por desecación de mares interiores.

El cloruro de potasio puede ser purificado mediante disolución y cristalización fraccionada en agua.

El sulfato de potasio y otras sales del mismo metal, residuos de algunas industrias, se utilizan también como abonos.

Cales y cementos

Definición. — **Cales:** Clasificación. Fabricación. Utilización. — **Cementos:** Clasificación. Fabricación. Utilización

Definición. — Las cales y cementos son productos obtenidos por calcinación de calizas (carbonato de cal) más o menos arcillosas y a las cuales se añaden, a veces, otras substancias. Las cales y cementos tienen la propiedad de formar con el agua unas masas pastosas que se endurecen y adquieren con el tiempo gran consistencia.

No existe característica física o química alguna que permita distinguir una cal de un cemento. La única distinción proviene del diferente modo de fabricación. Las cales se obtienen por calcinación, después de lo cual se apagan añadiendo la cantidad de agua necesaria para transformar la *cal viva* u óxido de calcio (CaO) en *cal apagada* o hidróxido de cal $Ca(OH)_2$. Los cementos, por el contrario, no sufren la operación de apagado.

Cales

Clasificación. — Existen cales *grasas*, procedentes de calizas con menos del 3% de impurezas, y cales *hidráulicas*, preparadas con calizas arcillosas. La composición de éstas varía en los límites siguientes:

Sílice	15 a 26 %
Alúmina	2 a 10 %
Óxido de hierro	0.5 a 5 %
Cal	51 a 66 %

Fabricación. — La calcinación de la caliza se hace en hornos fijos verticales, a una temperatura que oscila, para las cales grasas, entre 950 y 1 100° C. El calor necesario es suministrado por la combustión de coque, que se añade a la cal en forma de capas alternadas. La carga se efectúa por la parte superior del horno y la descarga por la base. Estos hornos son de funcionamiento continuo. Para asegurar la calcinación es preciso que el coque sea, aproximadamente, el 20% de la cantidad total de caliza considerada.

Utilización. — Las cales grasas se emplean en construcción en forma de morteros aéreos. Éstos se obtienen añadiendo agua a una mezcla de una parte de cal y tres o cuatro de arena. Esta mezcla se endurece por evaporación del agua y por formación de carbonato cálcico bajo la acción del gas carbónico del aire. La arena sirve para disminuir la contracción y facilitar el acceso del aire al interior del material. Actualmente, apenas se emplean las cales grasas en construcción, ya que los morteros aéreos no soportan la acción del agua más que durante un mes, aproximadamente. Las cales grasas encuentran gran aplicación en la industria química (fabricación de la sosa y del cloruro de cal), el curtido (encalado de las pieles), la industria del azúcar y la agricultura (tratamiento de las viñas). Los morteros preparados con cales hidráulicas tienen un fraguado más rápido que los morteros aéreos (por término medio 7 horas) y resisten perfectamente la acción del agua. El fraguado tiene su origen en una reacción entre la cal apagada y el silicato de aluminio de la arcilla. El apagado de las cales hidráulicas es más difícil que el de las cales grasas.

Cementos

Clasificación. — Existen tres clases importantes de cementos: cementos naturales, cementos artificiales y cementos de escorias. Los primeros se obtienen por calcinación de rocas naturales de composición regular (calizas arcillosas), seguida de una molienda fina. Los cementos artificiales se obtienen a partir de mezclas artificiales, cuidadosamente dosificadas, de cal o carbonato de calcio, sílice, alúmina y óxido de hierro. Los cementos de escorias proceden de la molienda de escorias de altos hornos, enfriadas bruscamente, con adición de cal grasa o hidráulica (30% como máximo) o de cemento artificial (15% como máximo).

Los cementos de alúmina son cementos que contienen más del 30% de alúmina.

Fabricación. — Los cementos naturales y artificiales se preparan en hornos giratorios. Éstos son cilindros largos (65 m), de 2,50 a 3 metros de diámetro, con una ligera inclinación sobre la horizontal y que giran alrededor de su eje. La materia prima es introducida por la parte superior del horno y, debido a la rotación de éste, desciende hacia la base, donde se descarga. La temperatura de calcinación de los cementos puede llegar a 1 550° C; se produce entonces un principio de fusión que aglomera el cemento en trozos denominados *clinkers*, los cuales se muelen a continuación, muy finamente. Para calentar los hornos se añade coque a la mezcla o se emplean quemadores de mazut; algunas veces se acude a la calefacción eléctrica. La producción de un horno de cemento es del orden de 200 toneladas en 24 horas.

En el procedimiento, menos empleado, denominado de la doble calcinación, se fabrica el cemento en hornos fijos verticales. Se trata siempre en este caso de cementos artificiales obtenidos mezclando cal y las materias necesarias para conseguir la composición química deseada. Como la fabricación de cal exige una primera calcinación, de ahí el nombre de doble calcinación del procedimiento.

Las composiciones de las diferentes clases de cementos oscilan entre los límites siguientes:

	Cementos naturales	Cementos artificiales	Cementos de escorias
Sílice	20 a 25 %	20 a 23 %	20 a 30 %
Alúmina	15 %	6,5 a 15 %	10 a 17 %
Óxido de hierro ...	15 %	2 a 4 %	1 a 2,5 %
Cal	51 a 56 %	60 a 65 %	40 a 52 %

Utilización. — Los cementos se emplean, como las cales, en la preparación de morteros, añadiendo agua a la mezcla de una parte de cemento y tres o cuatro de arena. El hormigón es un mortero de cemento al cual se incorpora cascajo u otros materiales.

Los cementos dan morteros cuya resistencia a la tracción es aproximadamente el doble de la de los morteros de cal.

Vidrio

Reseña histórica. Definición. Clasificación. Fusión. Vidrio de ventanas: Procedimiento Fourcault. Procedimiento Libbey-Owens. Procedimiento «American window glass» (según Senart). Vidrio de botellas. Lunas: Azogamiento. Cristal. Vidrios ópticos. Vidrios de laboratorio. Vidrio de sílice. Vidrios básicos. Vidrio colado. Vidrio armado. Vidrio soluble. Vidrios de seguridad. Otras aplicaciones del vidrio. Coloración de los vidrios

Reseña histórica. — La industria del vidrio, como la de la cerámica, es una de las más antiguas. El descubrimiento del vidrio se debió, tal vez, a un accidente en la cocción de ladrillos o utensilios de barro. Según parece, en Egipto fue donde aparecieron las primeras manifestaciones de la fabricación del vidrio. Se han encontrado pinturas que muestran la fusión y el soplado del vidrio, y que datan del año 2 500 antes de nuestra era.

Durante el reinado de Tiberio, al comienzo de nuestra era, existía ya una industria del vidrio en Roma. Esta industria substituyó a la egipcia. Constantino I llevó vidrieros de Roma a Bizancio, y así nació el vidrio bizantino. Los árabes crearon una industria del vidrio que reemplazó a la anterior, y fue la más importante del siglo XI al XIV. En el siglo XV la destronó la veneciana, que Marco Polo dio a conocer en sus viajes: Venecia obtuvo el monopolio del vidrio. En el siglo XVI, Alemania rivalizó con Venecia: Nuremberg y Praga eran los centros principales de la industria vidriera germánica. En 1609, **Gaspard Lehman** inventó el grabado del vidrio. Triunfó entonces el vidrio de Bohemia. Al final del siglo XVIII había en Bohemia 70 fábricas de vidrio y 5 000 vidrieros.

En el siglo XIX, importantes mejoras técnicas desarrollaron la industria del vidrio y vulgarizaron sus productos (hornos Siemens de gas, temple, vidrio irisado, etc.), y desde entonces los progresos técnicos en la fabricación no han cesado de aumentar.

Definición. — *Se llama* **vidrio** *a un producto inorgánico obtenido por fusión y que se ha enfriado, sin cristalizar, hasta adquirir un estado rígido.* Químicamente *es una mezcla de polisilicatos alcalinos, alcalinotérreos o de plomo y otros constituyentes.* Ordinariamente se presenta como una masa amorfa, transparente, translúcida u opaca, de densidad baja, cuyo punto de fusión es de unos 1 400° C (antes pasa por un estado pastoso).

El temple modifica su elasticidad, origina la doble refracción y aumenta su dureza; calentado largo tiempo, el vidrio se desvitrifica, se vuelve cristalino y adquiere aspecto de porcelana (porcelana de Réaumur); el agua y los ácidos lo atacan lentamente y le arrebatan las bases alcalinas; los álcalis, cuyo ataque es más fuerte, hacen desaparecer la sílice; el ácido fluorhídrico lo disuelve totalmente.

Clasificación. — Según lo expuesto se pueden dividir los vidrios en:

Vidrio de *sílice*, obtenido fundiendo sin fundente sílice pura, de gran resistencia térmica y química;

Vidrios de *una sola base o alcalinos* (de potasa o sosa); son los vidrios solubles, sólo utilizados como disoluciones;

Vidrio *potásico-cálcico*, que comprende el vidrio de Bohemia empleado en la fabricación de objetos de adorno y el *crown*;

Vidrio *sódico-cálcico*, que es el vidrio de ventanas, lunas y cristalería ordinaria de mesa;
Vidrios de *metales alcalinos, calcio, aluminio y hierro*. Es el vidrio verde o de botellas;
Vidrios de *plomo* y *potasio*, empleados en óptica y para efectos decorativos (cristal, *flint, stras*), en los cuales una parte de la sílice es a menudo reemplazada por el ácido bórico, y el plomo por la barita;
Vidrios *borosilícicos*, de aplicación en óptica y en trabajos científicos por el bajo coeficiente de dilatación que presentan con la temperatura.
En principio, en un vidrio de buena calidad predomina la sílice; un exceso de cal lo haría duro y difícil de trabajar; un exceso de potasa o de sosa le quitaría toda resistencia.
La sílice empleada suele ser arena cuarzosa.
La potasa y la sosa se añaden como carbonatos o sulfatos; la cal, en forma de creta o mármol; el plomo, en estado de minio. El caolín y el feldespato proporcionan el aluminio, que da al vidrio una resistencia especial.
La mezcla de las materias primas se efectúa de una forma sencilla, pesando las diversas sustancias que van a entrar en la fabricación y removiéndolas con una pala.

Fusión. — La mezcla, reducida a polvo, se calienta en un crisol. El polvo se aglomera y adquiere una consistencia viscosa, sin cesar de ser opaco, y, al elevar más la temperatura, la masa se va haciendo más fluida. A unos 1 500° C se hace líquida, se eliminan las burbujas de aire o de ácido carbónico que contiene y queda un residuo claro y homogéneo (vidrio afinado). Si se apaga el horno, el enfriamiento se hace de forma gradual y el vidrio se solidifica y queda transparente. Si el enfriamiento es lento, el vidrio adquiere resistencia y elasticidad. Si el enfriamiento es muy lento o se mantiene el vidrio durante cierto tiempo a una temperatura por encima de la de reblandecimiento, se forman puntos opacos cristalinos: esto es la llamada desvitrificación o cristalización.
Las principales etapas de la fabricación del vidrio son las siguientes: la *fusión*, que mantiene las materias vitrificables a una temperatura que las desembaraza de los elementos volátiles; la *calefacción* a temperatura más elevada, que disuelve la sílice en los álcalis; el *afinado*, que libra al vidrio de sus impurezas, y el *temple*, que corresponde a la fase de enfriamiento.
Antiguamente, la mezcla y la fusión se realizaban en unos crisoles de tierra refractaria o *pots*, de una capacidad de 400 a 800 kilogramos, colocados en un horno de reverbero. Los hornos de crisoles trabajaban intermitentemente; las cuatro etapas de fabricación se realizaban sucesivamente para cada colada, y la duración del ciclo era de unas 24 horas. Todavía se emplean estos hornos en la fabricación de vidrios ópticos y de planchas de vidrio por el método de colada.
Los nuevos tipos de hornos realizan la fusión en enormes recipientes de tierra refractaria cuya capacidad es de 20 000 a 40 000 kilogramos de vidrio fundido, el cual cubre todo el fondo del horno. Estos hornos, llamados *hornos-tanque*, son de funcionamiento continuo; los materiales vitrificables se añaden por uno de los extremos del tanque, y el vidrio fundido fluye por el otro extremo. Estos hornos se emplean para fabricar el vidrio de ventanas y el de botellas.

Vidrio de ventanas. — Antiguamente, el vidrio de ventanas se fabricaba, casi sin excepción, por soplado. Este método consistía en soplar en "caña" hueca a fin de inflar el vidrio fundido aglomerado en el otro extremo, con el que se formaba una "burbuja" más o menos cilíndrica que a continuación podía cortarse en caliente, y extenderse, para formar vidrios planos.
Sievert, en 1899, ensayó el soplado mecánico de los cilindros. Después se intentó substituir el soplado por un estirado mecánico para obtener así directamente las planchas de vidrio. Pero el primer procedimiento verdaderamente práctico fue el de **Fourcault** (1902). Modificado y perfeccionado, ha adquirido después una importancia considerable y ha hecho desaparecer, casi totalmente, en todos los países del mundo, la fabricación por soplado con la boca.

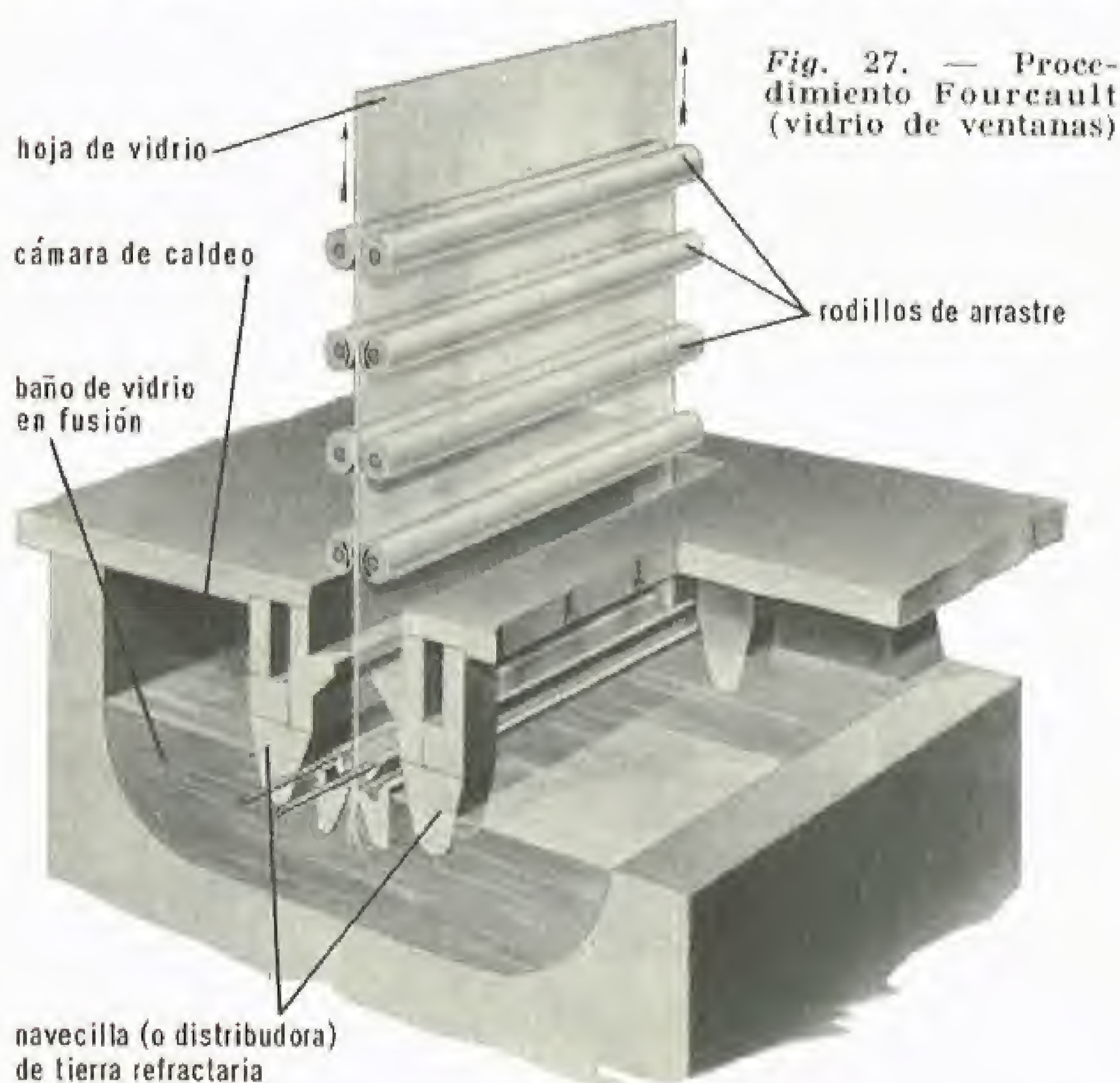


Fig. 27. — Procedimiento Fourcault (vidrio de ventanas)

Procedimiento Fourcault. — En medio del baño de líquido en fusión (*fig.* 27), hay una portadora (navecilla de tierra refractaria) con una ranura a lo largo de toda ella que sirve de matriz para formar la lámina de vidrio. Los bordes de esta navecilla están por debajo del nivel de la masa en fusión. Cuando el vidrio llega a ellos, es cogido por un anzuelo de metal dispuesto de tal modo que tira de él y lo estira en forma de hoja. Inmediatamente, el vidrio es enfriado por serpentines de agua adyacentes. La hoja así formada empieza a subir, sostenida por unos rodillos de acero cubiertos de amianto, y pasa a lo largo de una chimenea de una decena de metros, donde se templa. Cuanto más aprisa giran los rodillos, más delgadas son las hojas obtenidas. Al salir de la chimenea, las hojas son cortadas según el tamaño deseado, y se envían a la sección de acabado y tallado.

Procedimiento Libbey-Owens. — Inventado por **Colburn** en 1905, este procedimiento fue empleado en escala industrial durante la primera guerra mundial.
Dos cilindros guían, como en el procedimiento Fourcault, la hoja de vidrio. Pero al cabo de un trayecto de aproximadamente noventa centímetros, la hoja se dobla, en caliente, sobre un cilindro; avanza entonces horizontalmente y pasa por una mesa de aplanar y una cámara de temple horizontal, provista de una mufla y cuya temperatura máxima es 650° C.

Procedimiento "American window glass" (según Sénart). — Este procedimiento combina el estiramiento y el soplado.
Sobre el crisol y su hogar hay una armazón, a través de la cual se puede desplazar una caña vertical de soplado terminada en una especie de cono que, introduciéndose en la masa en fusión, toma cierta cantidad al comenzar su movimiento de ascenso. En la caña se introduce aire, que forma un cilindro de vidrio cuyo diámetro depende de la velocidad de la entrada de aire. Este cilindro se coloca sobre un caballete y se corta en trozos de 1 a 1,5 metros, los cuales a su vez se dividen longitudinalmente en otros dos o tres trozos. Este procedimiento es debido al norteamericano **Lubbers** (1905).

Vidrio de botellas. — Para este vidrio se emplean materias primas de calidad inferior y se aumenta la proporción de cal a expensas de la de sosa o potasa.
La materia se calienta, durante 24 horas, con los gases que salen del horno, antes de añadir el vidrio pulverizado o *groisil* y ser llevada al estado líquido.
El método de la caña sólo se utiliza en fábricas de poca importancia; en las grandes empresas, la fabricación está totalmente mecanizada.
En 1894, **Claude Boucher** patentó una máquina semiautomática provista de dos rodillos, uno desbastador y otro afinador. El vidrio fundido sacado del horno es manipulado por un obrero, que le da forma mediante soplado con aire comprimido, evitando así el soplado con la boca.
En el procedimiento **Owens** (1899), enteramente automático, el vidrio se saca del horno por succión. La máquina tiene de seis a quince brazos, y en cada uno de ellos hay un molde desbastador y otro afinador.
La máquina **O'Neill** tiene dos mesas circulares que giran en sentido inverso, la primera con seis moldes desbastadores, y la otra con ocho afinadores. Esta máquina puede fabricar de 12 000 a 40 000 unidades diarias.
El trabajo de las máquinas semiautomáticas es hoy totalmente automático gracias al empleo del *feeder*, aparato de distribución que vierte sobre el molde desbastador la cantidad precisa de masa vítrea para el objeto que se va a fabricar: botella o frasco.

Lunas. — Como el vidrio de luna debe ser perfectamente incoloro, es obligado emplear las materias primas más puras:

Sílice	69 a 75 %
Sosa	13 a 14 %
Cal (o barita)	13 a 15 %

Antiguamente, se fabricaban las lunas por un método de soplado que ya no se utiliza.
El vidrio se funde y afina en hornos de crisoles Siemens con regeneración de calor. La capacidad de estos crisoles ha aumentado desde 350 litros a más de 900. Los hornos contienen de 14 a 20 crisoles. La fusión del vidrio va seguida del afinado a temperatura más elevada, de forma que la mezcla sea homogénea y puedan eliminarse las burbujas de aire. Después se deja la masa en reposo durante una o dos horas.
El vaciado de los crisoles se realiza por medios mecánicos. Un puente metálico eleva los crisoles por encima de una mesa de hierro fundido, refrigerada por una corriente de agua y cubierta de arena fina. La mesa está provista de guías móviles, cuyo espesor, longitud y separación fijan las dimensiones de las planchas que se han de obtener.
Un cilindro de hierro pulido y refrigerado, cuyo peso es de algunos centenares de kilogramos, reparte el líquido sobre la mesa. La plancha se lleva seguidamente a un horno de 10 a 12 metros. Se deja recocer durante 24 horas y enfriar de 60 a 62 horas. Este método sólo se emplea ya para pequeñas producciones o cuando se trata de vidrios especiales.
Hoy se utilizan métodos automáticos para preparar el vidrio laminado en cinta continua. El vidrio se funde en hornos de 1 000 toneladas de capacidad. La alimentación se hace por un extremo, y por el otro sale el vidrio fundido y refinado. Este pasa entre dos rodillos enfriados por agua y baja por una pendiente a una mesa metálica donde unos rodillos lo prensan y le dan forma de cinta de espesor uniforme. Mientras la lámina está todavía al rojo, pasa, sobre unos rodillos de

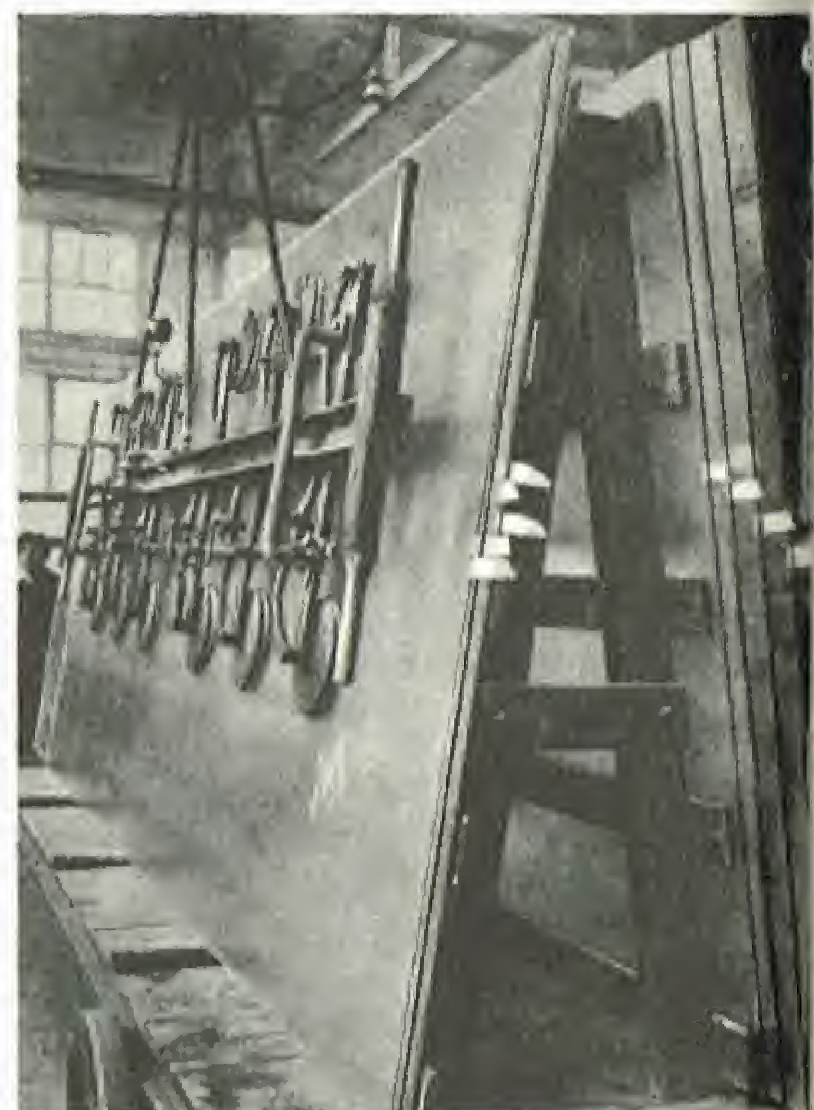












Algunos aspectos de la industria del vidrio: 1. Soplado de un globo destinado a ser un tubo de radio; 2. Vidriería en Trinets (Checoslovaquia); 3. Soldadura de la tubuladura sobre una bomba de vacío; 4. Talla del cristal; 5. Cinta de vidrio saliendo del horno; 6. Puente rodadero provisto de ventosas para transportar los vidrios; *(Fot. X.; E. Lessing; Embajada de Checoslovaquia; Kollar; St. Gobain)*

transporte, a través de una cámara de temple continuo de unos 100 metros de longitud. Al salir de la cámara se corta el vidrio.

Las lunas son empotradas en una serie de mesas rectangulares; unidas unas a otras, avanzan lentamente y son objeto de las sucesivas operaciones de limpieza, bruñido y pulimento. Para el bruñido y pulimento se utiliza el chorro de arena, así como discos de fieltro cubiertos de óxido de hierro.

Azogamiento. — Para transformar las lunas en espejos se coloca la luna en una mesa caliente y se cubre con una solución de nitrato de plata, mezclada con amoniaco y ácido tartárico o formol. La operación se hace en dos etapas: en la primera, se deposita la sal durante treinta minutos; a continuación, se da otra capa, a la que se deja actuar de 15 a 20 minutos.

La sal de plata es reducida y el metal se deposita y forma una capa brillante sobre el vidrio. Se seca ésta cuidadosamente y se cubre finalmente con un barniz y una capa de pintura para proteger la capa de plata.

Cristal. — Se llama cristal a las variedades de vidrio que contienen silicatos dobles de plomo y potasio. La importancia de estos vidrios es debida a sus elevados índices de refracción y dispersión, que los hacen muy apreciados en trabajos de óptica (v. VIDRIOS ÓPTICOS). Los cristales se funden, moldean, cortan y graban mucho más fácilmente que los vidrios sódico-cálcicos. Estas cualidades, y su brillo, hacen que sean empleados en la fabricación de vasos y objetos de adorno.

Vidrios ópticos. — Los principales vidrios ópticos son el *crown-glass* y el *flint-glass* (v. ÓPTICA, pág. 93).

El constituyente fundamental de estos vidrios es el silicato de plomo.

La selección de materias primas para su fabricación, así como la trituración y amasado, deben ser hechos cuidadosamente a fin de evitar el menor vestigio de óxido de hierro; frecuentemente, las cámaras de mezcla tienen las paredes de madera. Para la fusión se emplean crisoles de arcilla muy escogida.

Vidrios de laboratorio. — Los objetos de laboratorio (matraces, vasos de precipitados, cápsulas, etc.) deben resistir a los agentes químicos y a las variaciones de temperatura. Estas condiciones las cumplen los llamados *vidrios de borosilicato,* que son generalmente vidrios de sílice cuyo punto de fusión es rebajado por la adición de óxido de boro y, en menor cantidad, de alúmina. Suelen contener también pequeñas cantidades de óxido de sodio. Los más conocidos son el vidrio de Jena o de Bohemia, el vidrio americano, el *Pyrex* y el *Silior.*

Vidrio de sílice. — **Gaudin,** en 1839 fue el primero en realizar, con ayuda del soplete oxhídrico, la fusión del cuarzo y el trabajo del vidrio de sílice, estirándolo en hilos por moldeo a presión. Sin embargo, la fabricación industrial no se inició hasta 1905 en la Gran Bretaña y 1913 en Francia.

La sílice transparente se obtiene fundiendo cristales de cuarzo puro o ciertas cuarcitas. Su punto de fusión, muy elevado, 1 750° C, y las dificultades originadas por la gran viscosidad que posee fundido, hacen que actualmente el vidrio de sílice sea substituido en bastantes casos por el vidrio de 96 % de sílice *(Vycor)*, de técnica más sencilla y de propiedades muy parecidas a las del vidrio de sílice de 99,8 %. El vidrio de sílice se utiliza para fabricar varillas, tubos, crisoles de laboratorio, cápsulas, etc.; también encuentra aplicación en las industrias térmicas y metalúrgicas, en las industrias químicas, en la construcción de aparatos de calefacción y de alumbrado y en electricidad (aisladores de alta tensión y frecuencia elevada).

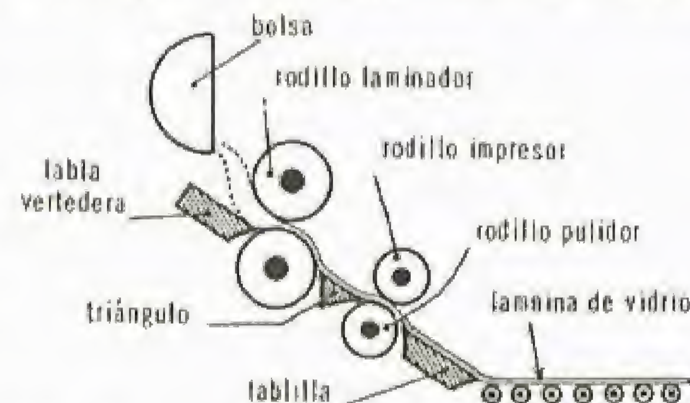


Fig. 28. — Máquina de Chance para fabricar vidrio colado

Vidrios básicos. — Estos vidrios se fabrican con basalto, escorias de altos hornos y escorias de los hogares. Los vidrios básicos se emplean en pavimentación y como aislantes.

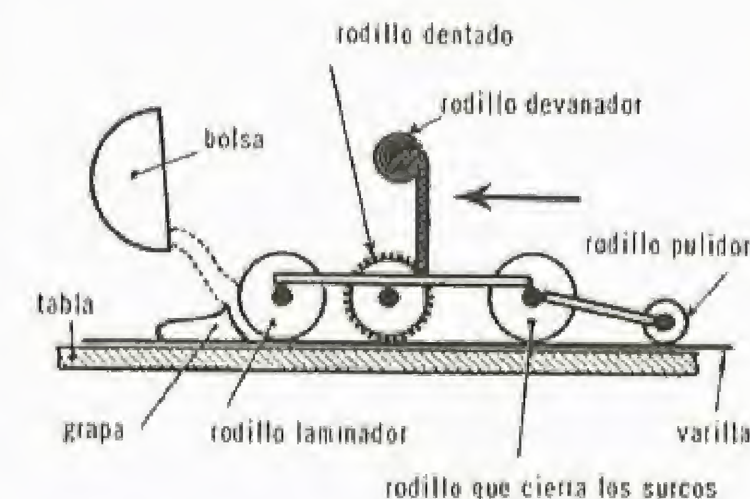


Fig. 29. — Procedimiento Schumann

Vidrio colado. Vidrio armado. — El *vidrio colado* se obtiene por colada del vidrio fundido, que se saca del horno mediante un caldero de acero, y empleando unos rodillos que lo comprimen y le dan la forma deseada.

Antiguamente no se fabricaba apenas más que vidrio liso, llamado de *catedrales,* vidrios estriados o con rombos y vidrios en relieve.

La máquina de Chance permite fabricar *vidrios* en relieve de todas clases (*fig.* 28).

Actualmente, se reemplaza el procedimiento del caldero por la colada continua.

El *vidrio armado*, fabricado por vez primera en 1885, lleva incrustado un enrejado metálico.

En el procedimiento *Appert*, se emplean dos calderos; con uno se forma una primera lámina de vidrio, sobre la cual se coloca el enrejado metálico; con el otro se forma otra lámina por el otro lado, y el enrejado queda así en medio de las dos láminas.

Fig. 30. — Máquina de Chance de dos calderos

En el procedimiento *Schumann* (*fig.* 29), sólo se fabrica una lámina. El enrejado es incrustado en ésta con ayuda de un cilindro estriado, y las señales de las estrías se hacen desaparecer por el último rodillo.

El vidrio armado, tanto liso como en relieve, se fabrica también con dos calderos, empleando la máquina Chance, a la cual se añade un segundo tren de rodillos. De aquí se ha derivado una máquina universal que permite fabricar toda clase de vidrio laminado (*fig.* 30).

Vidrio soluble. — El vidrio soluble, que es el silicato alcalino obtenido fundiendo la sílice con carbonato de sosa y añadiendo agua, o, mejor, atacando arena con una lejía alcalina caliente, tiene muchas aplicaciones industriales: además de su empleo en el proceso de *silicatización*, se utiliza para hacer incombustibles las telas, en la preparación de piedras artificiales por aglomeración de minerales pulverulentos y en la fabricación de colores para pintura; puede servir también como mordiente en tintorería y en la fabricación de jabones.

Vidrios de seguridad. — El vidrio armado tiene el inconveniente de no ser transparente. Se han podido obtener ya vidrios y lunas de seguridad perfectamente transparentes. El vidrio de seguridad está constituido por dos láminas de vidrio unidas a una fina lámina de celuloide o de una materia análoga, mediante un adhesivo (en algunos casos) o aplicando presiones y temperaturas apropiadas.

El adhesivo suele ser de gelatina y lo mismo la lámina de plástico en el tipo "Triplex". En los vidrios "Neotriplex" no hay más que una sola lámina de acetato de celulosa (*fig.* 31). Actualmente la lámina intermedia es una resina de polivinil butiral.

El segundo tipo de vidrio de seguridad, o vidrio de seguridad templado, es más resistente que el anterior a las fuerzas que producen flexión, pero más sensible al choque de objetos que rompan la capa comprimida. Consiste esta variedad en una sola lámina de vidrio sometida a un tratamiento térmico que comprime la superficie externa. Cuando se perfora esta superficie, se rompe en trozos muy pequeños. Este vidrio, tipo "Securit", se emplea en las lunas de los automóviles, para los vidrios llamados "irrompibles", etc.

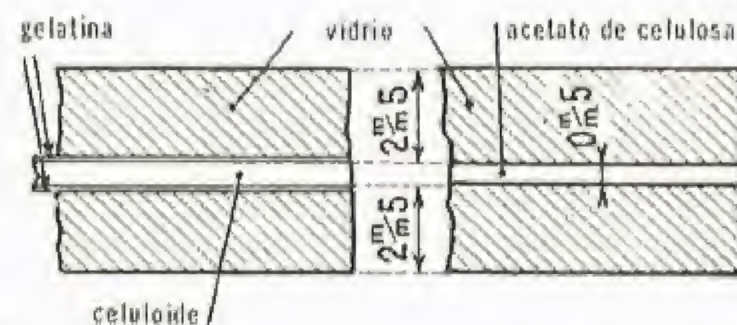


Fig. 31.—*A la izquierda:* vidrio Triplex; *a la derecha:* vidrio Neotriplex

Otras aplicaciones del vidrio. — Entre éstas pueden citarse el papel de vidrio, hecho con vidrio pulverizado y extendido sobre papel impregnado en cola, y la lana de vidrio, que sirve para fabricar tabiques de aislamiento.

Coloración de los vidrios. — Los vidrios coloreados se obtienen añadiendo al baño un agente apropiado, o precipitando partículas coloidales en el seno de un vidrio de por sí incoloro. En el primer caso, la adición de óxido cúprico (2 % de CuO) da el vidrio *azul;* la de óxido de selenio, el *rojo*, y la de óxido de cerio y titanio, el *amarillo*. En el segundo caso, la precipitación del oro coloidal da al vidrio el color *rojo rubí*. Otros agentes colorantes son el cromito de hierro para el *verde esmeralda*, el sulfuro de cadmio y el dióxido de selenio para el *rubí*, los óxidos de cobalto para el *azul*.

Cerámica

Reseña histórica. Definición. — **Productos porosos:** Productos mates. Productos vidriados. Loza: loza ordinaria. Preparación del esmalte estannífero. Hornos. Loza fina. Ladrillos. — **Productos impermeables.** Alfarería de gres. Porcelanas

Reseña histórica. — 1° *Loza.* Su origen es difícil de determinar. Los fragmentos recogidos en las excavaciones de Nínive y Babilonia muestran que el arte de esmaltar el barro debió ser practicado en Oriente desde la más remota Antigüedad. En los talleres de Asia Menor, los obreros persas fabricaron porcelanas para las mezquitas de Egipto y Turquía. Los persas revelaron el secreto de la fabricación a los árabes, los cuales introdujeron ésta en Europa, especialmente en España. En los siglos XII y XIII, Málaga fue un centro importante de cerámica; posteriormente sobresalieron las fábricas de las Islas Baleares y especialmente las de Mallorca *(mayólica);* en Valencia, en el siglo XV, se fabricaban vasos y grandes platos decorados.

Después de España, Italia es el país que muestra en Europa las más antiguas manifestaciones de alfarería esmaltada. Se ha atribuido a **Luca della Robbia** (1400-1482) la invención del vidriado de estaño. Por ese tiempo, al final del siglo XV, la fabricación y decoración de cerámica llegó a ser una de las ramas más importantes de la industria artística de Italia (Faenza, Ravena, Florencia, Siena, Urbino, Gubbio, Ferrara, Padua, Verona, etc.).

También en Francia, en el siglo XVI, aparecen algunas manifestaciones artísticas realizadas en cerámica, como las del castillo d'Ecouen. **Bernard Palissy** (1510-1589) creó una alfarería intermedia entre la porcelana italiana y el barro barnizado.

En el siglo XVII se construyó una fábrica en Nevers. En 1632, Francia contaba con cuatro manufacturas. La de Ruán fue pronto célebre y después la de Moustiers. Las tres fabricaban lozas decoradas sobre vidriado duro; la de Estrasburgo pintaba las decoraciones sobre el esmalte cocido.

Al final del siglo XVII y comienzo del XVIII se establecieron en Europa numerosas fábricas de vidriado de estaño. Las más célebres fueron las de Nuremberg y Delf.

Hacia 1710, **Wedgwood** creó, en Inglaterra, la loza fina en tierra de pipa. El nuevo producto se fabricó en Liverpool y en Worcester.

2° *Porcelana.* La industria de la porcelana nació en China, probablemente en tiempos del emperador Hoang-ti (2697 a. de J. C.). Tuvo cierta importancia durante la dinastía de los Han (206 a. de J. C.-86 d. de J. C.), pero su máximo esplendor data del siglo XIV, durante la dinastía de los Ming y especialmente bajo **Tching Hoang** (1465-1488).

En el siglo XIV, los venecianos importaron de China algunas porcelanas raras que causaron gran admiración. Hacia 1580, algunos sabios protegidos por los Médicis llegaron a fabricar una cerámica traslúcida análoga a la china.

En 1673, **Louis Poterat,** fabricante de loza de Ruán, intentó la fabricación de porcelana de China. En Saint-Cloud fue donde primeramente se fabricó, en proceso continuo, la porcelana blanca (a partir de una pasta vítrea mezclada con creta y marga caliza).

Hacia 1709, se descubrió un yacimiento de caolín en Alemania (Sajonia). El método de fabricación de la porcelana dura (Meissen) fue mantenido en el mayor secreto.

En 1756, la fábrica real de porcelanas de Francia fue trasladada a Sèvres. En España tuvo mucha importancia la fábrica real de Aranjuez. En 1763 y 1766, se descubrió caolín en Francia y se crearon numerosas fábricas de porcelana. Finalmente, desde 1800, la porcelana dura substituyó a la porcelana blanda.

Definición. — Se denomina cerámica al conjunto de productos obtenidos mediante la cocción de pastas cuyo principal constituyente es la arcilla. Estos productos son numerosos, desde el ladrillo y la alfarería de gres hasta la loza, la porcelana y el bizcocho. Las diferencias entre los productos cerámicos provienen de su composición, su aspecto y la temperatura de cocción.

Según la naturaleza de la pasta cocida, los productos de la cerámica se dividen en dos grandes clases: porosos e impermeables.

Los productos *porosos* tienen un granulado terroso, permeable a los líquidos y a las grasas; comprenden: 1°, los productos más o menos coloreados de rojo; *barro cocido, alfarería barnizada* con un vidriado silicoalcalino o plumbífero, loza estannífera cubierta de un vidriado opaco a base de óxido de estaño que enmascara el color de la pasta; 2°, los productos a base de una pasta permeable blanca y fina, cocidos a más alta temperatura y cubiertos de un esmalte transparente: *loza fina, loza fina de piedra, tierra de pipa;* 3°, los productos refractarios, resistentes a las altas temperaturas: *ladrillos, cacetas, retortas*, etc.

Los productos *impermeables* deben sus propiedades al reblandecimiento y vitrificación de la pasta a alta temperatura. Comprenden: 1°, la *alfarería de gres*, de pasta dura y opaca; 2°, las *porcelanas*, cuya pasta es dura, blanca, traslúcida, y que se dividen en porcelanas duras y porcelanas blandas.

Productos porosos

Se distinguen dos tipos de productos porosos: los mates y los vidriados.

Productos mates. — En éstos la arcilla plástica es sometida a cocción y no se le da ninguna capa de barniz o vidriado. Esta clase comprende las alcarrazas, botijos, macetas de flores, tejas y tubos de desagüe.

Las *tejas* se fabrican mezclando barro arcilloso y arena, reduciendo el todo a una pasta fina homogénea, que no debe contener materias calizas. Se recoge la arcilla al final del otoño y se extiende en un sitio húmedo, donde se deja cierto tiempo; después se moldea. El moldeado se efectúa con unas prensas que aplastan la masa de pasta, dándole el espesor conveniente. Después de moldeada, se seca con cuidado y se mete en el horno.

Productos vidriados. — En la fabricación de éstos se emplean margas arcillosas o arcillas plásticas puras, a las cuales se añade una cuarta parte de arena para disminuir la contracción de la arcilla. Por cernido, se quitan las piedras al barro, se lava seguidamente y se conserva en un sitio húmedo durante algunos meses; de esta forma la pasta arcillosa adquiere flexibilidad. El barro y la arena mezclados, ya por amasado con los pies, ya con una mezcladora, se llevan a un torno de alfarero, que es una rueda horizontal movida con el pie, donde el alfarero le da la forma deseada; las asas, mangos, etc., se preparan aparte, y después se pegan a la forma con barro. El cacharro se deja secar y, a continuación, se lleva al horno para sufrir una primera cocción (bizcocho). El vidriado consiste en impregnar el bizcocho de una pasta de minio, arcilla y arena, que se funde durante la cocción y da un silicato de plomo brillante e impermeable (900-950° C). Hay también vidriados sin plomo.

Loza. — Bajo el nombre de loza, se engloban los utensilios barnizados (de que acabamos de hablar), la loza común o estannífera, la loza fina, la loza fina de piedra, la tierra de pipa, etc.

Loza ordinaria. — La pasta de esta loza es semejante a la de la alfarería barnizada, pero se prepara con materias más escogidas; la marga es a veces substituida por la creta. El color propio de la pasta es anulado con un esmalte de silicoaluminato de plomo, sodio y potasio, o calcio, que se vuelve opaco y blanco por adición de óxido de estaño (de ahí el nombre de vidriado estannífero).

Se comienza por dar forma a las piezas, ya torneando la pasta plástica, ya por vaciado de la pasta líquida o barbotina en moldes de yeso.

El torno del alfarero está constituido por un eje vertical que puede girar sobre sí mismo y tiene un disco en cada una de sus extremidades. El disco inferior, grande y pesado, es movido por el pie del alfarero: en las fábricas modernas, no existe este disco y el torno es movido eléctricamente. La pasta se deposita sobre el disco superior en forma de bola; el obrero, presionando lateralmente con las manos, convierte la bola en un cilindro; después, hace el hueco interior utilizando al principio el dedo pulgar y finalmente con la mano.

Cuando se utiliza el procedimiento del vaciado, la bola de pasta se coloca en un molde, cuya forma interna se parece ligeramente a la del utensilio que se va a fabricar: por ejemplo, una taza. Este molde gira sobre su eje con gran rapidez y el obrero introduce en su interior una masa metálica, denominada *alisador*, cuyo perfil interior es casi el mismo de la taza. El alisador se coloca con respecto al molde de modo que los ejes de ambos coincidan exactamente. El alisador empuja la pasta contra las paredes del molde, y el sobrante es rechazado hacia afuera. La pieza, así obtenida, se saca del molde, es secada y llevada al torno, donde un obrero, con unas láminas de metal en forma de cincel, da forma a la base y proporciona a la taza la configuración externa definitiva.

Las piezas circulares grandes y de poca profundidad, como platos, fuentes y palanganas, se fabrican por *moldeado con plantilla*. La arcilla plástica se comprime dentro del molde, que está girando, y así se obtiene una de las superficies; la otra se moldea haciendo bajar sobre el molde una plantilla cuyo perfil es el de la pieza.

El *vaciado* se emplea en la producción de piezas de paredes muy finas; se realiza con un molde de yeso, cuyo interior presenta todas las particularidades del relieve externo del utensilio. El yeso absorbe el agua de la pasta arcillosa, y en las paredes del molde se deposita una capa de pasta bastante consistente. La pieza se separa del molde antes de la desecación completa.

La cocción de las piezas crudas y no esmaltadas a unos 900° C da el bizcocho de loza, el cual se esmalta a continuación por inmersión, riego o pulverización con un pincel. Sobre el esmalte sin cocer, se hace la decoración a mano por medio de pinceles y utilizando colores vitrificables; el bizcocho, una vez vidriado y decorado (decorado "bajo vidriado"), se cuece a una temperatura de 950-960° C.

El decorado así ejecutado se llama *decorado a gran fuego* porque es cocido a una temperatura bastante elevada (lozas de Nevers, Ruán, etcétera).

El bizcocho se puede esmaltar en blanco, cociéndolo antes de la decoración, y después, sobre este esmalte blanco ya cocido, realizar el decorado con colores más fusibles (decorado "sobre vidriado") y recocerlo para fijarlo, a una temperatura más baja denominada *fuego de reverbero* (Marsella, Estrasburgo).

La mayólica (nombre derivado de la isla de Mallorca) se diferencia de las lozas descritas en que la decoración no se hace con colores, sino con esmaltes que llevan ya los colores. En la loza, el color suele estar debajo del esmalte, pero en la mayólica el color lo lleva el propio esmalte.

Preparación del esmalte estannífero. — El esmalte estannífero se obtiene fundiendo, en un horno especial, una mezcla de calcina (óxido doble de plomo y estaño), arena cuarzosa caolínica y feldespática de Decize, minio, sal de sosa y sal marina. La calcina se puede reemplazar por una cantidad calculada científicamente de minio y óxido de estaño.

La mezcla de materiales se funde y se vierte en agua fría, donde se pulveriza. Después se tritura finamente hasta obtener una papilla clara, que constituye el baño de esmalte. A éste suele añadírsele sal o vinagre para evitar la emplomadura.

En general, las materias primas de los esmaltes pueden agruparse en cuatro grupos: *refractarias* (cuarzo, feldespato, arcilla), *fundentes* (bórax, carbonato sódico, criolita y espato flúor), *opacificantes* (óxido de estaño, óxido de antimonio, antimoniato sódico y óxido de circonio) y *colorantes* (óxidos, elementos, sales, etc.). A esas materias primas se añaden agentes de flotación y electrolitos.

Hornos. — Los hornos empleados antiguamente para la cocción de la loza estannífera eran rectangulares y se calentaban con madera; actualmente se emplean hornos redondos o *muflas*, calentados con madera, hulla o gas.

Loza fina. — La loza fina es un producto de alfarería de pasta blanda, opaca, porosa, dura, cubierta de un esmalte transparente y en general incolora. La pasta es muy silícea y está compuesta de: sílice, que forma el cuerpo de la masa; un elemento plástico arcilloso o caolínico, y un elemento fusible feldespático o calcáreo.

La *loza fina de piedra* está compuesta de arcilla y sílice, sin fundente.

La *tierra de pipa* es una mezcla de arcilla, sílice y creta o frita.

La *loza fina feldespática* está formada por una mezcla de sílice, arcilla, caolín y feldespato o feldespato cuarzoso descompuesto.

Existen otras muchas variedades de lozas finas: loza granítica, semiporcelana, porcelana opaca, etc.

Para fabricarlas se muele y se disuelve en agua, separadamente, cada una de las materias primas, y se obtienen así barbotinas cuya densidad, y el porcentaje de materias primas por tanto, son conocidos. Se toman volúmenes determinados de cada barbotina y se mezclan para obtener una barbotina única. Esta barbotina puede emplearse directamente, o filtrada en un filtro prensa. El modelado de las piezas puede realizarse por torneado, desbaste, calibrado, moldeado, vaciado o prensado. Finalmente, se realiza una doble cocción; la primera, entre 1 200 y 1 280° C, da el bizcocho de loza fina.

La cocción se realiza en hornos redondos de funcionamiento discontinuo o en hornos túneles de funcionamiento continuo, que utilizan unas vagonetas circulantes. Estos *hornos túneles* están construidos con ladrillos refractarios. En la parte superior se queman los gases; en la inferior circulan las vagonetas sobre raíles, bajo los cuales hay una zanja con agua. Las vagonetas se cargan con las piezas que se han de cocer; éstas se colocan en unas cajas de tierra refractaria llamadas *cacetas*. El calor aumenta gradualmente desde la entrada del túnel hasta el centro, y luego disminuye hacia la salida.

Después de la primera cocción, las piezas se decoran con sellos de caucho, almohadillas o aplicando calcomanías.

Preparadas así las piezas, son sumergidas en un baño de esmalte especial y recocidas a 1 100° C. De esta forma, el esmalte se vitrifica y aparece la decoración a través del vidriado incoloro.

El esmalte se prepara en hornos de fusión, en los que se introduce la mezcla de arena, feldespato, minio, bórax, caolín y creta. Fundida la mezcla, también llamada frita, se echa en agua fría, donde se pulveriza en cristales muy finos; después se muele finamente mezclándola con agua, caolín y arena.

La loza fina es más apreciada que la estannífera no sólo por ser más barata, sino por su mayor solidez.

A causa de diferencias entre los coeficientes de dilatación del esmalte y el producto cerámico, la loza puede presentar algunos defectos, como el "cuarteado". Se aprovecha algunas veces este fenómeno para obtener las lozas *agrietadas*.

Ladrillos. — Los ladrillos, primeras materias artificiales que el hombre ha fabricado, se secaban antiguamente al sol; hoy día se suelen cocer en hornos apropiados.

Para su preparación se emplea arcilla ordinaria, a la cual se añade, para desengrasarla, arena o caliza pulverizada; si por el contrario, la arcilla tiene poca grasa, se añade cal.

Al ladrillo se le da la forma en unos marcos rectangulares sin fondo, cuyo volumen es un poco mayor que el de un ladrillo cocido. Estos ladrillos se llaman de "barro blando" y son de excelente calidad. En el método moderno o de "barro duro", se añade menos agua a la masa arcillosa y se emplean unas prensas especiales. Después se secan los ladrillos al aire libre, en tablas o en túneles de secado. Una vez secos, se cuecen en hornos calentados con carbón (875-1 100° C).

Los ladrillos de adorno y los productos de alfarería para uso culinario llevan como revestimiento una especie de esmalte transparente obtenido por inmersión en un baño de agua que contiene en suspensión una mezcla finamente molida de bórax, cristales, arcilla, sílice y minio.

Los *ladrillos refractarios*, especialmente los silicocalcáreos, requieren una preparación especial, pues es preciso dar forma a productos que no tienen ninguna plasticidad.

Productos impermeables

Alfarería de gres. — Son diferentes la alfarería de *gres común*, formada por una mezcla de arcillas *vitrificables*, a las cuales no se añade ninguna materia fundente para la cocción, y la alfarería de *gres fina*, formada por arcillas cuya falta de fusibilidad se corrige con la adición de un fundente, ordinariamente feldespático.

El vidriado de la alfarería de gres suele hacerse por *saladura*, que consiste en echar sal común en el hogar del horno, hacia la mitad y el final de la cocción. La sal se volatiliza, se deposita y se combina con la arcilla en la superficie de las piezas, formándose una fina capa de silicoaluminato alcalino vitrificado.

Cuando se aplica el vidriado en la parte alta de los utensilios, el fuego resbala por las paredes y produce irisaciones *(alfarería flameada)*.

Porcelanas. — La porcelana se diferencia de la loza en que la cocción *vitrifica* la masa, que se hace traslúcida. En principio, la preparación de las pastas es la misma en las porcelanas y en las lozas,

pero varía la proporción de los constituyentes según los productos que se van a fabricar. Para obtener la porcelana *dura*, por ejemplo, los productos esenciales son el caolín y la arena.

El conformado de las piezas se realiza igual que en la loza. También se usa el moldeado cuando la pasta se lamina en un rodillo y la lámina obtenida se coloca sobre el molde, comprimiéndola con una esponja húmeda a fin de reproducir todas las particularidades del molde.

Una vez dada la forma a las piezas, se les incorporan los aditamentos (v. gr.: asas de las tazas), pegándolos con un poco de barbotina. Se seca la pieza y se somete a una cocción incompleta, seguida por la cocción completa (bizcocho). La decoración puede hacerse encima o debajo del vidriado; en el primer caso, la cocción se realiza antes de la decoración; en el segundo, se decoran y esmaltan las piezas y se someten después a la cocción.

Para la cocción de las piezas se emplean preferentemente hornos de marcha discontinua, que tienen dos cámaras denominadas laboratorios: las piezas se meten en cacetas para preservarlas de las llamas (horno de cacetas). La cámara superior sirve para la calefacción previa; la cocción se efectúa en el laboratorio inferior.

Metalurgia

Reseña histórica. — En las más antiguas sepulturas se han encontrado objetos de oro, plata, bronce y hierro. Los chinos conocieron el hierro desde el año 2 000 antes de nuestra era; anteriormente había existido la civilización del bronce. En Egipto y Caldea, el cobre puro fue empleado antes que el bronce. El bronce fue conocido en Egipto cerca de 3 700 años antes de J. C. De todas formas, el uso del bronce fue bastante restringido a causa de que los yacimientos de estaño eran lejanos y poco numerosos.

Entre los descubrimientos metalúrgicos de la Antigüedad, hay que citar la *soldadura*, inventada por **Glamos** hacia el siglo VII antes de J. C., y el *vaciado*, que permitió a **Teodoro** obtener la primera estatua de bronce aplicando el procedimiento de la cera absorbida, aún empleado hoy día. Según cuenta la *Odisea*, los griegos conocieron y aplicaron también el *temple*.

En la Edad Moderna, casi todos los grandes descubrimientos están relacionados con la siderurgia: el hierro de fundición (s. XV); la cementación (s. XVII); el afinado de la fundición en horno de pudelar mediante una escoria básica (final del s. XVIII); después, el afinado neumático, inventado en 1855, por **Bessemer** (1813-1898); el afinado en horno de gas, ideado en 1858 por **W. Siemens** (1823-1883), y el afinado desfosforante de **Sidney G. Thomas** (1850-1885) han permitido obtener grandes lingotes por colada; finalmente, la introducción de metales como el níquel y el cromo en la fabricación del acero, las nuevas aleaciones de cobre y los procedimientos electrolíticos han permitido obtener metales muy puros, como el cobre, y extraer a un precio relativamente económico otros metales cuya obtención era costosa, como, por ejemplo, el aluminio.

Definición. — *La* **metalurgia** *es el arte de extraer los metales de los minerales que los contienen y transformarlos en formas adecuadas a los usos a que van a destinarse.*

Métodos generales empleados en metalurgia. — A excepción de algunos metales preciosos, como la plata, el oro y el platino, los metales no suelen encontrarse generalmente en estado nativo, sino casi siempre en diversas combinaciones con el oxígeno o el azufre. Estos compuestos naturales, que constituyen lo que se llama *minerales*, son sometidos a tratamientos mecánicos y químicos para extraer el metal.

Tratamientos mecánicos. — Estos tratamientos tienen por objeto separar las partes ricas en metal, o *mena*, de la *ganga*. Suelen consistir en una *molienda* realizada en dos etapas: quebrantamiento en una machacadora de mandíbulas o de martillos, y trituración en molinos de bolas, barras, etc.

A continuación se efectúa el *tamizado*, en el cual los elementos se clasifican por tamaños. Para ello se utilizan tamices planos o cilíndricos; también puede recurrirse a la acción de una corriente de agua en mesas sacudidoras o al empleo de tamices vibratorios. Los separadores magnéticos se aplican cuando se desea separar el hierro y el níquel. Por último, se utiliza también la flotación.



La metalurgia en el siglo XV: lavado y cernido del mineral (Agrícola) [*Doc. Larousse*]

En ciertos casos (siderurgia), los minerales pulverizados son *aglomerados* y transformados en briquetas, generalmente por adición de un fundente.

Tratamientos químicos. — La finalidad de los tratamientos químicos es destruir las combinaciones formadas por los metales, de forma que puedan obtenerse éstos en estado más o menos puro. Estas reacciones pueden realizarse por vía seca, por vía húmeda o por procedimientos electrolíticos.

Tratamientos por vía seca. — La principal característica de las reacciones por vía seca es el empleo de calor. Estos tratamientos suelen consistir en una simple *fusión*, para los minerales que contienen los metales en estado nativo; en una *reducción* con carbón y óxido de carbono, para la mayor parte de los óxidos, carbonatos y silicatos (v. gr.: reducción de la casiterita, $SnO_2 + 2CO \longrightarrow Sn + 2CO_2$); en una *aluminotermia*, reducción de ciertos óxidos por medio del aluminio (v. gr.: reducción del óxido de cromo, $Cr_2O_3 + 2Al \longrightarrow Al_2O_3 + 2Cr$; en una *tostación y calcinación*, y en una *precipitación*, para algunos sulfuros (v. gr.: extracción del plomo de la galena por el hierro, $PbS + Fe \longrightarrow FeS + Pb$).

En estos tratamientos, sólo excepcionalmente se separa el metal por volatilización (cinc, cadmio, mercurio); es más corriente que sea obtenido en estado líquido, para lo cual se añaden fundentes a la mezcla sometida a tratamiento, a fin de eliminar las materias extrañas mediante la formación de *escorias*.

Tratamientos por vía húmeda. — Se prepara una combinación soluble del metal que se ha de extraer y se precipita el metal de la disolución, ordinariamente con otro metal. Este procedimiento se aplica a metales relativamente preciosos y raros, puesto que supone el empleo de un metal ya separado. Así, para la extracción de la plata y el cobre de algunos productos, éstos se transforman en cloruros, de donde se precipita el metal con hierro.

Tratamientos por vía eléctrica. — La electricidad interviene en metalurgia ya como medio de calefacción, ya en la electrólisis de soluciones acuosas o sales fundidas.

La electrólisis constituye la base de la metalurgia aplicada a las sales fundidas (aluminio, magnesio, tratamiento de minerales pobres de cobre y cinc).

Siderurgia

La siderurgia es la metalurgia del hierro, del hierro colado y del acero. Es la rama más importante de la metalurgia. Los centros siderúrgicos suelen establecerse en las proximidades de las minas de hulla o de hierro o en los puertos de desembarque de esos minerales, y consisten en fábricas, donde la producción de hierro colado va seguida frecuentemente de una transformación de este hierro en acero, en forma de piezas fundidas o laminadas listas para su uso inmediato.

El conocimiento del hierro nos viene de la más remota Antigüedad. Al principio, para fabricar el hierro se excavaba un hogar en el suelo y allí se acumulaba el mineral y el carbón vegetal. Al cabo de algunos días se retiraba del hogar un aglomerado sólido, formado por una esponja de hierro mezclada con escorias. Este procedimiento se perfeccionó con el empleo de hornos con hogar cerrado e inyección de aire *(forjas catalanas)*. Al final del siglo XIV, un herrero alemán tuvo la idea de utilizar el residuo líquido que se encontraba en el fondo de un horno catalán, que era lo que hoy se llama hierro colado. Actualmente se fabrica el hierro colado en un alto horno a partir del mineral; después se utiliza como tal o se transforma en hierros comerciales por el procedimiento de pudelado o en aceros por el método del convertidor, el horno de solera, el horno de crisol o el horno eléctrico. Algunas veces se obtiene el hierro en estado puro por vía electrolítica o por aluminotermia; otras veces, partiendo del acero, se obtiene hierro colado sintético.

Hierro colado
Alto horno

Los principios teóricos aplicados en los procedimientos siderúrgicos no han cambiado desde hace muchos años. Hasta ahora, no se ha podido obtener en la práctica el hierro o el acero directamente a partir del mineral. El método empleado es el indirecto, en el cual el mineral es reducido por el coque en el alto horno: el exceso del carbono empleado se disuelve en el metal fundido.

Alto horno. — El alto horno consta de una cavidad, la *cuba*, formada por dos troncos de cono. El *tragante* es la parte superior, por donde se introduce el carbón, el mineral y el fundente; el *vientre* es la zona del horno de mayor diámetro; los *etalajes* forman la parte del tronco de cono inferior más vecina del vientre, y la *obra* es la parte inferior de ese mismo tronco de cono, por donde se introduce el aire a través de las *toberas* a una temperatura de 600-800° C; finalmente, el *crisol* es el lugar donde se recogen los productos de la fusión del mineral, el hierro colado líquido, sobre el cual nadan las escorias. En los altos hornos modernos, los gases de la combustión se emplean para recalentar el aire introducido por las toberas. La instalación se completa con un cargador automático y recuperadores de calor *(cowpers)*, grandes cámaras llenas de ladrillos refractarios en las cuales se queman los gases que salen del horno; el calor producido sirve para calentar el aire de alimentación de las toberas. Cada recuperador funciona alternativamente: mientras uno es calentado por los gases que salen del horno, el otro calienta el aire que va a las toberas, y viceversa.

En la parte inferior del crisol existe una abertura para dar salida al hierro colado; un poco más arriba hay otra abertura que permite extraer las escorias. La pared del horno es de material refractario, cuya naturaleza varía según la parte del horno; el conjunto está sujeto por una fuerte armadura metálica exterior; para proteger el revestimiento de refractario, así como las partes sensibles al calor (toberas, agujeros para la colada), el horno está dotado de unos órganos de refrigeración con circulación de agua.

Funcionamiento del alto horno. — La carga del alto horno con el mineral de hierro, el fundente y el coque, se realiza por el tragante. Con frecuencia se mezcla el mineral con cantidades apropiadas de productos de distinto origen, a fin de obtener una fundición de la calidad deseada. La composición del *fundente* suele variar según cual sea el mineral; si éste es rico en sílice, se emplea la *castina*, caliza que transforma la sílice en un silicato fusible; si el mineral es calcáreo, se añade un fundente rico en sílice, como pizarras arcillosas, granito, etc. Las proporciones relativas de los distintos constituyentes se determinan por análisis.

Según el mineral y el fundente van descendiendo, la temperatura del horno va aumentando; el carbón se quema por la acción del aire ascendente. Este carbón y el óxido de carbono producido en la combustión toman el oxígeno del mineral. Más abajo el metal funde; la ganga y el fundente forman compuestos fusibles que van a parar a la base del horno.

Unas mirillas situadas a la altura de las toberas permiten vigilar la marcha del alto horno. En cuanto empieza a fundirse la *escoria*, silicato procedente del fundente y de la ganga del mineral, se inyecta por las toberas aire fuertemente calentado. El coque, gracias a este aire, se quema y forma anhídrido carbónico que se transforma en óxido de carbono a esa elevada temperatura. A la altura de las toberas es donde la temperatura del horno es más elevada (1 800° C), y donde el hierro se funde y se mezcla con cierta cantidad de carbono. El mineral ha liberado ya completamente el metal a causa de la acción ejercida en el vientre y los etalajes por el óxido de carbono, que reduce el sesquióxido del mineral. El metal cae al crisol y es protegido de la oxidación del aire de las toberas por una capa de escorias fundidas que, a causa de su menor densidad, queda por encima de él. Cuando el crisol está lleno, se quita el tapón y la masa líquida incandescente sale a través de unos canales de arena hasta los moldes, donde se enfría el hierro colado y se obtienen los lingotes.

Una vez puesto en marcha el horno, éste funciona día y noche sin descanso durante una decena de años, hasta que haya que reponer la camisa interior refractaria.

Aparatos de carga automática. — Actualmente, la carga del horno se hace mecánicamente. El mineral, el coque y los fundentes se cargan en unos cangilones que suben por un plano inclinado hasta llegar a la boca del horno, la cual está provista de una tolva que se cierra mediante un cono de contrapeso. Cuando los cangilones descargan en la tolva, la carga abre el cono por su peso y se introduce en el horno.

Depuradores de gas. — Los gases que salen del horno tienen una temperatura de 150 a 200° C y, a causa de diversas reacciones con las materias sólidas en el curso de la ascensión en la cuba, contienen gases combustibles tales como óxido de carbono e hidrógeno. Antes de tratar de recuperar este calor latente, es preciso depurar los gases porque arrastran una cantidad relativamente grande de polvo que podría ensuciar u obturar rápidamente los aparatos de recuperación.

Recuperadores de calor (tipo Cowper o Withwell). — Una parte de los gases depurados se quema en la cámara de combustión, formada por ladrillos apilados; cuando la cámara está suficientemente caliente, se detiene el paso del gas procedente de los depuradores y se lanza aire frío en sentido contrario, el cual se recalienta y va directamente a las toberas, y así sucesivamente; generalmente hay, para cada alto horno, cuatro recuperadores, de los cuales tres funcionan simultáneamente y por permutación continua, mientras el cuarto queda en reserva o está en reparación.

Central. — La central utiliza el resto de los gases depurados en motores de gas pobre. Hoy día se mejora el rendimiento, aumentando la presión y mediante el empleo de turbinas de vapor.

Los motores de gas mueven directamente las máquinas ventiladoras, las cuales envían aire atmosférico a los recuperadores y después al alto horno. El exceso de gas se emplea para accionar motores de gas acoplados directamente con alternadores que constituyen la parte más importante de las centrales eléctricas en los centros siderúrgicos modernos.

Hornos de coque. — Las instalaciones siderúrgicas completas poseen, además, hornos de coque necesarios para el suministro de combustible. El tipo empleado es el de hornos de coque de recuperación de subproductos y regeneración del calor de los humos, en los cuales más de la mitad de los gases de destilación queda disponible y puede ser enviada a los talleres siderúrgicos.

Productos del alto horno. — Los altos hornos pueden producir, además del hierro colado ordinario, cierto número de productos llamados *ferroaleaciones:* ferromanganeso, ferrosilicio, etc. El horno eléctrico permite obtener aún más productos (aceros especiales).

Diferentes clases de hierro colado. — El hierro colado es una aleación de hierro y carbono (2,5 a 5 %) con porcentajes inferiores de manganeso y silicio y cantidades pequeñas de impurezas tales como azufre y fósforo. Se distinguen los hierros colados *blancos*, en los que el carbono está en estado de cementita (como en el acero), y los hierros colados *grises*, en los que el carbono se halla en estado de grafito, menos duros que los blancos y más estables. Entre los blancos y los

grises están los hierros colados *atruchados*, cuyas propiedades carecen de interés.

Los hierros colados poseen una temperatura de fusión relativamente baja; los grises son muy fáciles de trabajar.

Las cualidades del hierro colado dependen mucho de la marcha del proceso; si se añade demasiado carbón y se practica la llamada *marcha caliente*, se obtiene el hierro colado gris, muy carburado y con cantidades notables de grafito y sílice; con la *marcha fría*, se obtiene el hierro colado blanco, producto menos carburado y más rico en manganeso.

Se distinguen también los hierros colados *hematites* (pobres en azufre y fósforo), preparados a partir de mineral muy puro (hematites), y los hierros colados *fosforosos*, obtenidos a partir de mineral fosforoso y destinados a su conversión en acero por procedimientos básicos.

El hierro colado que sale del crisol puede ser convertido en lingotes en moldes de arena, o ser mantenido en estado líquido en mezcladores y enviado a la fábrica de acero.

Los lingotes sirven para la refundición en otras fábricas (vaciado, acero). Se puede también afinar el hierro colado en un horno de reverbero para obtener los hierros pudelados. Finalmente, el hierro colado es elaborado a veces a partir de desechos o recortes de acero, que se funden en un horno eléctrico y se recarburan *(hierro colado sintético)*.

Utilización industrial. — Por su facilidad para el vaciado, el hierro colado se emplea siempre que se tiene necesidad de piezas de formas complejas o de tamaño muy grande. Por su buen coeficiente de frotamiento, se utiliza en la construcción de soportes y cojinetes.

Pudelado. — Descarburando el hierro colado se obtiene hierro (pudelaje) o acero. El horno de pudelar es un horno de reverbero donde se coloca el hierro colado líquido y se oxida el carbono con una corriente de aire en presencia de escorias ferruginosas. Al descarburarse el baño, la temperatura de fusión se eleva; llega un momento en que la temperatura del horno es insuficiente para mantener la masa en estado líquido y el hierro se separa en estado de masas pastosas, que se sacan del horno. A continuación se golpean éstas con un martillo pilón para provocar la expulsión de las escorias; el producto obtenido es particularmente apto para la forja y la soldadura.

Fabricación del acero

En el procedimiento de la forja catalana, el mineral se reducía por el carbón de madera y se obtenía el hierro colado, pero éste no era el único producto; en la parte más caliente, a la entrada del aire, se obtenía algo de acero. En el alto horno no se obtiene más que hierro colado, que hay que descarburar en otro aparato.

Actualmente, aunque en raras ocasiones, se obtiene el acero por pudelaje *(acero pudelado)*, pero la casi totalidad del acero se debe a los procedimientos de baño líquido.

Hay que citar también el *acero cementado*, obtenido carburando la superficie de un acero poco carburado por calefacción en un recinto cerrado en contacto con cuerpos ricos en carbono (fabricaciones especiales).

Los procedimientos de baño líquido se dividen en procedimientos con insuflación de aire y procedimientos sin insuflación de aire.

Procedimientos con insuflación de aire. Convertidores. — Este procedimiento, inventado por Bessemer (1855), sólo sirve para fundiciones no fosforosas. Sidney G. Thomas extendió su aplicación a las fundiciones fosforosas (1878).

Convertidor Bessemer. — El baño que hay que tratar (hierro colado líquido, al cual se añade a veces chatarra) se introduce en una gran retorta, a través de cuyo fondo se insufla una fuerte corriente de aire que quema las impurezas del hierro colado: esta combustión despide, al mismo tiempo, el calor necesario para elevar la temperatura del baño desde la del hierro colado en fusión (unos 1 200° C) hasta la del acero en fusión (unos 1 600° C). La oxidación de impurezas comienza por el silicio y el manganeso, los cuales dan una escoria que flota en la superficie del baño; el carbono pasa a óxido de carbono, que arde con el aire insuflado y da una gran llama. El aparato donde se realiza la oxidación de las funciones con el aire insuflado es el *convertidor*. Éste es una especie de retorta construida con una chapa fuerte de hierro y revestida interiormente de una camisa refractaria silicoaluminosa que puede resistir elevadísimas temperaturas. El diámetro de los convertidores pasa a veces de los tres metros y la capacidad de tratamiento es de 30 toneladas de metal cada vez. El aire, procedente de las máquinas ventiladoras, se introduce por la parte inferior del convertidor y penetra en el interior por numerosos agujeros dispuestos en el suelo refractario.

Convertidor Thomas. — Este convertidor se llama también *convertidor básico*. Es el único empleado hoy, porque los hierros colados fosforosos que trata proceden de minerales baratos. En este convertidor el revestimiento ácido del de Bessemer ha sido reemplazado por un revestimiento básico de dolomita. La combustión del fósforo es, por otra parte, una de las principales fuentes de calor en este procedimiento. La insuflación de aire suele continuarse algunos minutos después de haber desaparecido todo el carbono del hierro colado; así se elimina todo el fósforo. En una central siderúrgica puede haber tres o cuatro grandes convertidores Thomas, lo que da una producción de 1 500 a 2 000 toneladas de acero en 24 horas.

Mezclador de hierros colados. — Para uniformizar la composición y temperatura del hierro colado empleado para la fabricación del acero, se ha reemplazado el cubilote, horno de cuba donde se cargaban los lingotes y el coque (hierro colado de segunda fusión), por el *mezclador de hierros colados*, en el cual se recogen cinco o seis coladas sucesivas de uno o varios altos hornos. Este mezclador, revestido de ladrillos refractarios y con quemadores para la calefacción, está montado sobre un pivote de forma que pueda introducirse o extraerse el metal líquido.

Por otra parte, se producen en este caso ciertas reacciones, especialmente una disminución notoria del contenido en azufre, que pasa a la superficie del baño en forma de sulfuro de manganeso.

Procedimientos sin insuflación. — **Horno Martin-Siemens o procedimientos del horno de solera.** — El *horno de solera* (*fig.* 32) es un horno cuadrangular, bastante parecido al empleado en el pudelaje; se calienta con los gases de un hogar colocado a uno de los lados y la carga se hace por unas puertas laterales. Se funden muchas toneladas de hierro colado sólido o, si es posible, líquido, mezclándolo con chatarra.

La principal dificultad, durante largo tiempo, fue conseguir la temperatura necesaria para la fusión y las reacciones. Hacia 1870, Siemens tuvo la idea de aplicar el principio de sus hornos de gasógeno con recuperación de calor al procedimiento Martin y hacer así realizable industrialmente la fabricación del acero en horno de solera.

Lo mismo que en el convertidor Bessemer, el *procedimiento Martin* sólo se aplicó al principio a las fundiciones libres de fósforo, ya que el recubrimiento del horno Martin era ácido (a base de sílice y alúmina). El descubrimiento del procedimiento Thomas llevó a los metalúrgicos a construir hornos Martin básicos (dolomita para hierro colado fosforoso).

La carga de los productos sólidos se hace con un cargador de cangilones, cuyo contenido se vierte en el horno a través de las puertas. Terminada la fusión, se prolonga el calentamiento con una llama oxidante para descarburar el baño por intermedio de la escoria formada (calcárea o silícea). La escoria se elimina y se vuelve a formar de nuevo en las sucesivas adiciones de mineral.

Debido a la larga duración de la operación, es posible hacer rapidísimos y periódicos análisis del baño y vigilar la marcha del proceso hasta obtener la concentración de carbono deseada en el acero.

Cuando el acero ha adquirido la calidad requerida, se hace la colada, tras la eliminación de la última escoria, sea haciendo un agujero en la pared de horno, sea basculándolo, como en los últimos modelos de hornos, que son móviles alrededor de un eje.

Estas mejoras mecánicas han permitido variar las condiciones de trabajo y operar ya sobre el hierro colado líquido tratado con mineral *(ore process)*, ya sobre chatarra sometida a nueva fusión *(scraps process)*, y aun acoplar el funcionamiento de varios hornos, dedicando cada uno de ellos a una parte de la operación. En el *procedimiento Bertrand Thiel* se emplean dos hornos Martin semejantes del tipo oscilante. En el primero, se somete el hierro colado a una temperatura poco elevada en presencia de sustancias básicas —se produce una eliminación notable de silicio y de fósforo—. El líquido así purificado se vierte en el segundo horno Martin, u horno secundario, en el cual se han dispuesto y calentado previamente la chatarra y el mineral. La descarburación se efectúa con mucha rapidez. El *procedimiento Talbot* utiliza un horno oscilante. Cuando ha terminado la primera fase de la operación, sólo se vierte un tercio del acero producido y se vuelve a llenar el horno con hierro colado. Al cabo de poco tiempo, continuando las oscilaciones para agitar la masa, se obtiene una nueva mezcla homogénea de acero, de la cual se extrae de nuevo sólo la tercera parte, y así sucesivamente. La producción de acero es muy considerable y las coladas poseen más calidad y uniformidad.

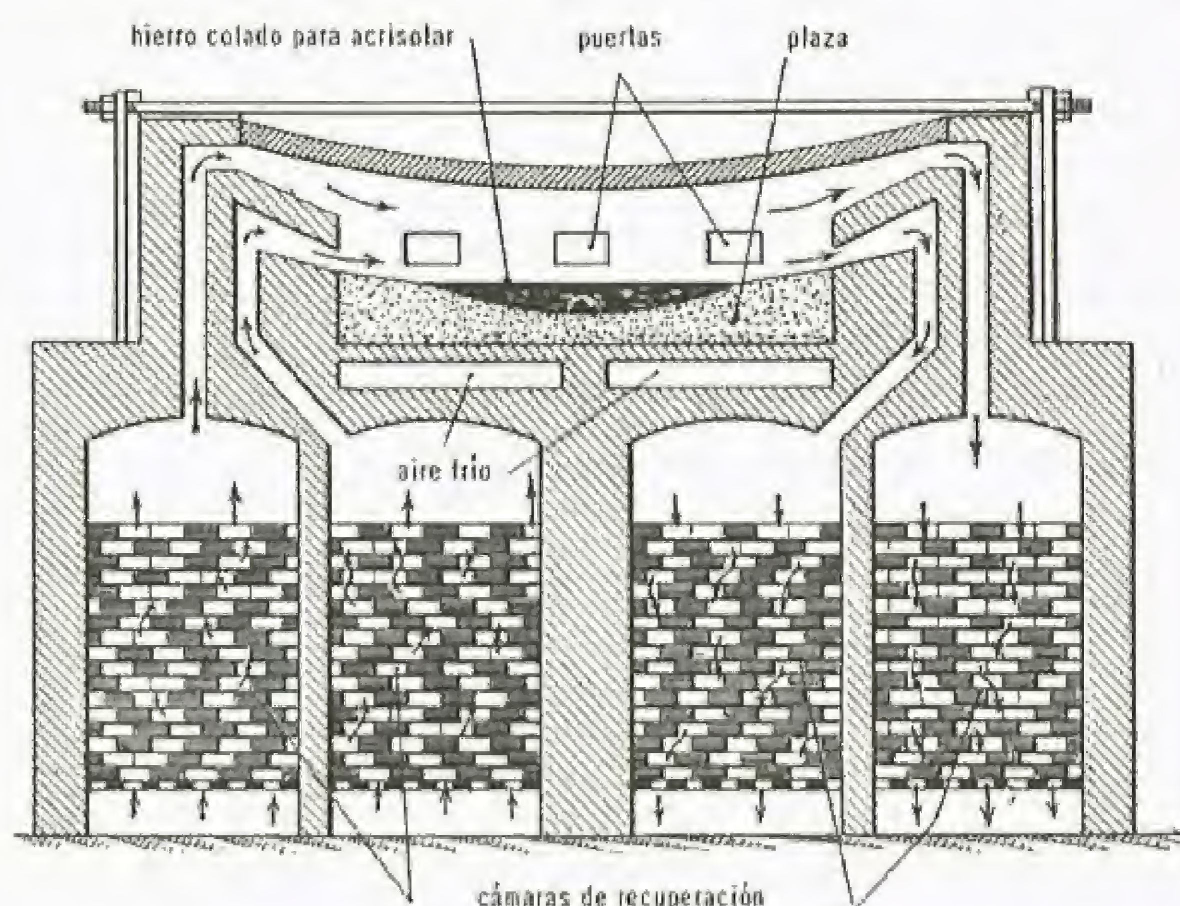


Fig. 32. — Corte de un horno Martin

Horno eléctrico de arco. — El afinado de los aceros de alta calidad se realiza en un horno de arco. Éste es un horno de solera, ácido o básico, en el cual el metal se calienta por un arco eléctrico, producido entre uno a varios electrodos de grafitos y el baño de metal, que hace el papel de segundo electrodo (horno Héroult). La metalurgia del horno de arco no difiere, en sus principios, de la del horno Martin, pero permite obtener mejores aceros por las dos razones siguientes:

1ª La temperatura del horno es más elevada y más fácilmente regulable, lo que permite la posibilidad de emplear escorias poco fusibles y por tanto más variadas que las utilizadas en el horno Martin;

2ª Mientras que en el horno Martin la atmósfera que rodea el metal, constituida por los gases de combustión del hogar, es forzosamente oxidante, la del horno de arco puede ser neutra o reductora; lo cual permite emplear escorias reductoras.

Para disminuir el consumo de corriente se carga a menudo el horno de arco con acero líquido procedente de un horno Bessemer, Thomas o Martin.

Un método especial de afinado en el horno de arco consiste en añadir el acero líquido sobre la escoria ya fundida. Se forma así una emulsión de escoria en el acero, que favorece las reacciones entre los dos productos y disminuye la duración del afinado (procedimiento Perrin). La emulsión se destruye rápidamente y la escoria se separa con facilidad del metal.

Horno de crisol e inducción. — La fusión en un crisol, calentado primeramente con carbón y después con gas, fue el primer método para obtener acero fundido; más tarde, la fusión en un crisol no se empleó más que en la producción de aceros de gran calidad. La aparición del horno de arco, que permitía obtener productos bastante buenos y a coste inferior, hizo desaparecer, casi completamente, la fusión en crisol, hasta que se inventó el horno de inducción. Éste es un horno de crisol calentado eléctricamente por inducción. Para ello, el crisol está rodeado por un circuito eléctrico por donde pasa una corriente de 500 a 2 000 períodos por segundo. El acero que se encuentra en el crisol hace el papel de circuito primario de un transformador y es recorrido por corrientes de inducción intensas que lo calientan hasta llegar a la fusión.

La metalurgia del horno de inducción es muy sencilla; se trata de una simple fusión que permite decantar totalmente las escorias y añadir los constituyentes especiales que se deseen introducir en el acero.

El horno de inducción puede llegar a fundir hasta diez toneladas de acero, y ello con gran facilidad de maniobra y mucho más rápidamente que con los crisoles calentados con gas. El consumo de corriente varía desde 500 a 1 000 kWh por tonelada de metal. El horno de inducción descrito se llama también *horno de alta frecuencia*.

Hierro. Hierro colado. Acero. — Es muy difícil dar una definición correcta del hierro, del hierro colado y del acero sin recurrir a las consideraciones fisicoquímicas de equilibrio entre los constituyentes.

En forma simplificada:

Los *hierros colados* son los productos carburados con más del 2,5% de carbono, caracterizados por su falta de maleabilidad;

Los *aceros*, menos carburados que el hierro colado, son maleables y tienen la propiedad fundamental de poder tomar el temple;

Los *hierros* tienen un contenido de carbono inferior a 0,05%; son maleables, pero no adquieren el temple.

Desde el punto de vista práctico, los aceros son los de mayor importancia. Los aceros ordinarios se distinguen de los aceros de calidad por su contenido en ciertas impurezas, entre las cuales ocupan el primer lugar el azufre y el fósforo.

Un acero de calidad debe contener menos de 0,015% de azufre; los aceros ordinarios llegan hasta 0,050%.

Aceros especiales y aleaciones de hierro. — Los aceros especiales, que no hay que confundir con los aceros de alta calidad, son aceros en los cuales se introducen ciertos elementos, especialmente metales, a fin de proporcionarles propiedades particulares. Estos aceros especiales se pueden agrupar en tres clases: aceros con baja proporción de elementos extraños; aceros con alta concentración de estos elementos, y aceros con propiedades especiales, que son más bien aleaciones.

Aceros de bajas concentraciones. — El total de elementos añadidos al acero no pasa del 6%. Para aumentar la dureza del acero se emplean el manganeso, el cromo y el silicio. Para darle más ductilidad, sin alterar demasiado la resistencia, se utilizan el tungsteno y el vanadio. Un mismo acero puede contener cuatro o cinco elementos diferentes. Por ejemplo, un acero al níquel contiene 2% de níquel; al cromo, 0,90% de cromo; al molibdeno, 0,80% de molibdeno.

Hay una gran variedad de estos aceros, cada uno de ellos apto para un fin particular.

Aceros de altas concentraciones. — Éstos comprenden, por una parte, los aceros llamados "inoxidables", y en segundo lugar, los aceros que conservan su resistencia y su dureza a alta temperatura.

Los aceros inoxidables pueden dividirse en tres clases: los que contienen menos del 16% de cromo y pueden adquirir el temple; los que tienen más del 16% de cromo, y los que, además de cromo, contienen níquel. Entre éstos, el más corriente es el 18/8, así llamado porque contiene 18% de cromo y 8% de níquel.

Los aceros que conservan sus propiedades mecánicas a altas temperaturas son los aceros para herramientas de corte "rápido", que permiten el corte o el fresado aun cuando se calienten hasta el rojo obscuro; contienen, por ejemplo, un 18% de tungsteno, 4% de cromo y 1% de vanadio, respectivamente. Algunos de ellos no contienen casi hierro, v. gr.: 45% de cobalto, 32% de cromo, 13% de tungsteno, y el resto, es decir, el 10%, de hierro. Los aceros para turbinas y motores de reacción, que han de trabajar a temperaturas que llegan a 700° C, contienen níquel, molibdeno, cobalto, tungsteno y, a veces, titanio y niobio.

Aceros de propiedades especiales. — Éstos son en general los aceros denominados de construcción; se emplean para usos muy especiales. Podemos citar los aceros no magnéticos, de un 20 a un 30% de níquel; el invar, con un 36% de níquel y cuyo coeficiente de dilatación es muy pequeño, y el elinvar (32% de níquel, con pequeñas cantidades de otros elementos), cuyo coeficiente de elasticidad varía poco con la temperatura. Éste sirve para fabricar muelles para cronómetros y aceros para resistencias de calefacción eléctrica, que contienen también proporciones elevadas de cromo y níquel.

Metalurgia de otros metales

Metalurgia del cobre. — El cobre, del que los dos más grandes productores son los Estados Unidos y Chile, es casi exclusivamente extraído de las piritas, donde se encuentra en estado de sulfuro. Por tostación se obtienen minerales concentrados o *matas*.

Se pueden citar tres importantes procedimientos de obtención. En el primero, se parte de minerales oxidados, que son reducidos con carbono en un horno de cuba, escorificando la ganga y las principales impurezas. Hoy se mezclan los minerales oxidados con minerales sulfurados, o se les añaden materias sulfurantes (yeso y carbón). En Katanga se reducen directamente los óxidos.

El segundo procedimiento es una mezcla de vía húmeda y vía seca; se emplea generalmente con minerales pobres: el mineral sulfurado se tuesta a baja temperatura en hornos mecánicos, se forma sulfato, que se disuelve con agua ligeramente acidulada, y el metal se precipita por electrólisis, utilizando ánodos insolubles de plomo antimonioso o de carbón.

En Río Tinto (España) se utiliza un método por vía húmeda exclusivamente. El mineral se deja a la intemperie durante varios meses para que el aire vaya oxidando los sulfuros. El sulfato formado se disuelve con agua y en esta solución se precipita el cobre añadiendo chatarra de hierro (cementación).

El método con el que se produce la mayor parte del cobre es el del *convertidor*.

El mineral sulfurado se tuesta parcialmente; después se funde en un horno de cuba (*water-jacket*) para obtener la mata, que es un concentrado de cobre y metales preciosos en forma de sulfuro doble de cobre y hierro, mientras que el hierro oxidado en la tostación pasa a las escorias como silicato de hierro. Las escorias se separan de la mata por decantación. Algunas veces, esas dos operaciones pueden ser reemplazadas por la *fusión pirítica*, esencialmente oxidante, en la cual el calor necesario para la operación es suministrado por la combustión de algunos elementos, especialmente el azufre.

Para afinar la mata obtenida se pasa directamente al convertidor, donde se oxida la sílice, y el hierro pasa a la escoria. A continuación, se realiza una tostación parcial de la masa; de esta forma reaccionan el óxido y el sulfuro restante para dar cobre bruto, en el cual se encuentran algunas impurezas, como metales preciosos.

Este cobre bruto sufre un primer afinado en el horno de solera con revestimiento silíceo; algunas impurezas se volatilizan y otras, reaccionando con la sílice, pasan a las escorias; se agita la masa con ramas verdes para verificar una reducción completa del óxido de cobre (método del *perchado*).

Finalmente, el cobre afinado es sometido a electrólisis (procedimientos de ánodos solubles), que permite separar el oro y la plata en los barros y obtener un cobre más puro.

Aleaciones de cobre. — Las principales aleaciones de cobre son: los *latones ordinarios* (cobre y cinc), de hasta 45% de cinc; los *latones especiales*, con un tercer metal (plomo, estaño, níquel, aluminio, manganeso y hierro); los *bronces ordinarios* (cobre y estaño); los *bronces especiales*, con un tercer metal (hierro o estaño); el *cuproníquel* (cobre y níquel) y el *maillechort* (cobre, níquel y cinc).

En los bronces se añade también fósforo, en forma de fosfuro de cobre o fosfuro de estaño, con objeto de desoxidar el producto en el momento de la colada.

Entre los bronces especiales, citaremos el bronce al plomo (30%), con un coeficiente de frotamiento muy bajo.

Actualmente se intenta reemplazar en los bronces el estaño por el silicio.

Los latones especiales presentan una serie de propiedades muy importantes. Unos son empleados a causa de su color blanco y de su resistencia a la oxidación (latones al níquel); otros, a causa de su resistencia a algunas formas de corrosión (latones al aluminio, empleados en tubos de condensadores); otros son preferidos por sus propiedades mecánicas (latones al manganeso).

Citemos también el *monel* (aleación cobre-níquel), obtenido a partir de un mineral de cobre (v. METALURGIA DEL COBRE); por sus propiedades mecánicas, coloración e inalterabilidad, es muy apreciado en grifería, en decoración y utensilios domésticos, así como en la industria química.

Los bronces autolubricantes se obtienen por compresión en caliente, pero sin llegar a la fusión, de un polvo con 89% de cobre, 9,75% de estaño y 1,25% de grafito. Estos bronces son porosos, absorben los productos lubricantes y los desprenden poco a poco, de forma que los soportes de rodamiento hechos con ellos no necesitan ser engrasados.

Recientemente se han obtenido unas aleaciones de cobre y berilio (2 — 2,5%) perfectamente desoxidadas y de enorme resistencia y dureza.

Metalurgia del plomo. — El plomo se extrae casi exclusivamente de su sulfuro, la galena, por tostación total y reducción posterior. Los tres países que ocupan el primer lugar en la producción de plomo son Australia, los Estados Unidos y México.

La tostación total es la transformación completa del sulfuro en óxido; una reducción posterior, mediante fusión, da de nuevo el sulfuro.

La tostación solía efectuarse al aire libre; después se realizó en hornos de modelos diversos; hoy se utilizan hornos continuos del tipo *Dwight y Lloyd* (ver *fig.* 33), donde la tostación del mineral tiene lugar en tupidas parrillas que soportan capas de mineral de un espesor de 8 a 12 centímetros. Las partículas sólidas que arrastra el metal se eliminan a la salida de éste por filtración o por un método eléctrico; el anhídrido sulfuroso desprendido puede utilizarse para la fabricación de ácido sulfúrico.

La fusión reductora, segunda operación metalúrgica, puede ser realizada con adición de carbón, por reacción directa entre los componentes obtenidos con oportuna tostación. La reducción se hace en *water jacket* (hornos refrigerados con agua) y sin adición de coque.

En minerales ricos en plomo y con poca sílice, se utiliza un procedimiento de tostación parcial y reacción (procedimiento Newman), con el que se extrae inmediatamente el 92% del plomo; las escorias resultantes, ricas en plomo, se tratan en un horno de cuba.

El plomo de los hornos de fusión reductora, llamado plomo de obra, ha de ser refinado para eliminar las impurezas nocivas que contiene y extraer la plata. Ésta suele ser desprendida añadiendo cinc al plomo fundido.

Metalurgia del cinc. — Este metal, del que los principales productores son los Estados Unidos, Australia, Canadá, México y España, se extrae del sulfuro (*blenda*), del silicato (*calamina*) y del carbonato (*smithsonita*). La calamina y la smithsonita se transforman en óxidos por calcinación; las blendas, mediante tostación, y el óxido obtenido se reduce con carbón. Esta reducción comienza a una temperatura superior al punto de ebullición del metal, de modo que el cinc es recogido en forma de vapores que hay que condensar, operación que es la más difícil y delicada de toda la metalurgia del cinc. La transformación del óxido en vapores del metal se efectúa en hornos de mufla. Después se somete el cinc bruto a un refinado.

La tostación de la blenda requiere altas temperaturas (900° C) y exceso de aire. Como la blenda no puede quemarse en el aire por sí misma, necesita la aportación externa de calor, que suele hacerse añadiendo carbón (120 kg. de carbón por tonelada de mineral).

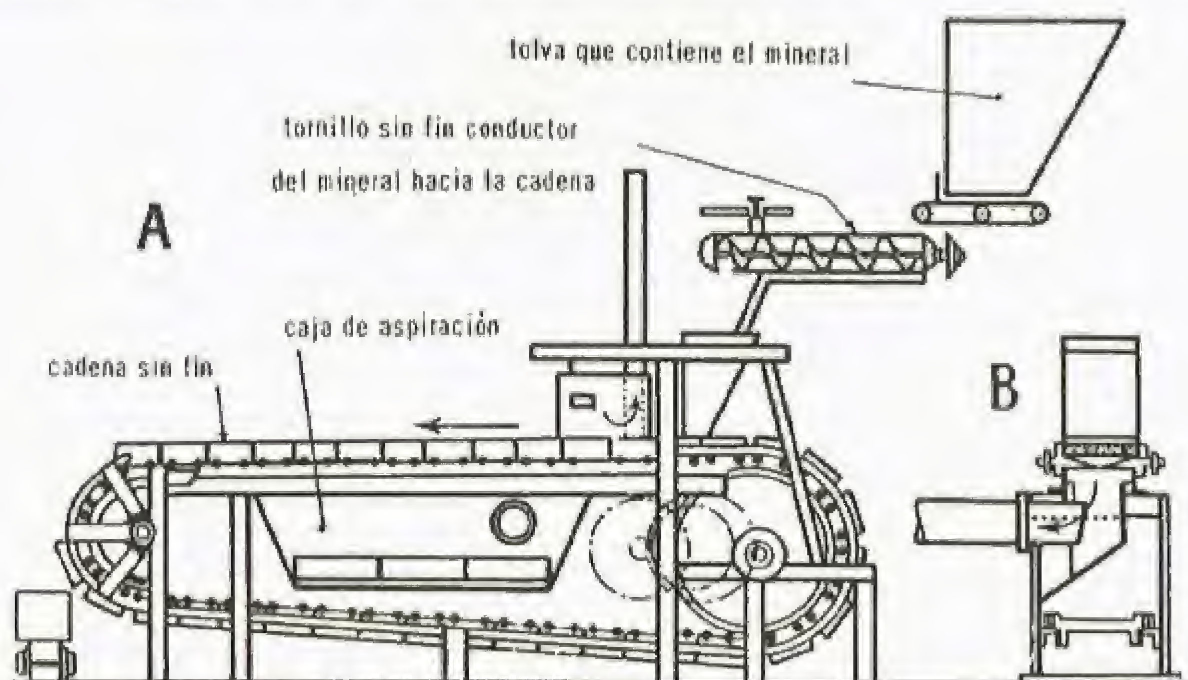


Fig. 33. — Procedimiento Dwight y Lloyd. Aparato de cadena sin fin: A. Alzado; B. Corte

La reducción y condensación del cinc se hacen en unos crisoles o retortas de gres colocados unos encima de otros dentro de unos hornos calentados con carbón o gases de gasógenos. Los hornos están provistos de recuperadores de calor. El cinc bruto se afina fundiéndolo en un horno de reverbero de solera inclinada.

En los minerales pobres se emplea el procedimiento utilizado en Anaconda, consiste en una tostación a baja temperatura de la blenda con producción de sulfato de cinc, disolución de éste en agua y purificación de la disolución, especialmente por precipitación del cadmio por el cinc. El cadmio se recoge y se trata aparte, se electroliza el cinc con ánodos insolubles de plomo, y el cinc puro (99,9%) se deposita en cátodos de aluminio.

Actualmente se realiza también la reducción directa de la blenda con hierro, en hornos eléctricos de resistencia: en este caso, el cinc destilado se condensa íntegramente.

Metalurgia del estaño. — El estaño se obtiene de su óxido, la *casiterita*, que se reduce en un horno de reverbero. Un afinado permite eliminar la pequeña cantidad de plomo que contiene el metal bruto. Ocupan el primer lugar en la producción de estaño la Federación Malaya y Bolivia.

El mineral pulverulento, procedente de la concentración magnética y frecuentemente electromagnética, que permite la separación del tungsteno, se trata en un horno de solera, debajo del cual se encuentra un recipiente con agua encargado de recoger el estaño que cuela.

La reducción de la casiterita puede efectuarse perfectamente en el horno eléctrico.

Tiene cierta importancia la recuperación del estaño de los desecnos de hierro blanco. Se utiliza un procedimiento a base de cloro que permite la separación perfecta del estaño en forma de cloruro estánnico.

Metalurgia del antimonio. — Se extrae el antimonio de su sulfuro, la *estibina*, Sb_2S_3. Se funde sulfuro de hierro en un horno de reverbero, se añade el sulfuro de antimonio, y después hierro progresivamente, a fin de recoger por separado las primeras cantidades de antimonio precipitado. Éstas contienen la mayor parte de los metales preciosos.

El procedimiento más empleado consiste en una tostación volatilizante que transforma el Sb_2S_3 en Sb_2O_3, el cual es arrastrado con los gases fuera del horno; finalmente, se reduce el Sb_2O_3 con carbón en un horno de reverbero, bajo una capa de sales fundidas, verdadero vidrio líquido, a fin de evitar una nueva volatilización.

El antimonio bruto se afina por fusión con carbonato sódico y sal común. La primera sal elimina el azufre y la segunda forma cloruros con las impurezas.

Metalurgia del níquel. — El níquel se extrae de silicatos y sulfuros, especialmente la *garnierita*, silicato complejo de níquel, magnesio y hierro. El procedimiento actual de fabricación consiste en obtener una mata de mineral mediante una fusión en horno de cuba, añadiendo previamente al mineral sulfato de calcio y coque (o sea el azufre necesario para la mata y la cal indispensable para la formación de la escoria); a continuación, introduciendo la mata en un convertidor, se obtiene sulfuro de níquel; por tostación total de este sulfuro, se obtiene el óxido NiO, que se somete a una calcinación reductora, para lo cual se moldea previamente en forma de cubos o rodajas.

Este procedimiento es un tanto ilógico, puesto que consiste en añadir azufre al mineral oxidado para absorber el metal que interesa.

El níquel se refina por fusión con manganesa y escorificación de ésta.

Algunas veces se trata la garnierita por un procedimiento electrotérmico; de esta forma se obtiene un ferroníquel con baja cantidad de carbono y silicio. Seguidamente se refina esta aleación por electrólisis para obtener el níquel.

Existen también piritas niquelíferas, cuyo tratamiento es algo más complicado, porque el mineral contiene no solamente níquel, hierro y azufre, sino también cobre.

Una fusión, precedida de una tostación apropiada, permite concentrar el níquel y el cobre en una mata ternaria. El hierro de esta mata se elimina en el convertidor, y la mata se transforma en un sulfuro doble de cobre y níquel. El paso siguiente puede ser un tratamiento con sulfuro de sodio, que absorbe el sulfuro de cobre, una electrólisis o una reducción después de una tostación total del sulfuro doble (metal monel). Citemos finalmente el método de Houd: efectuada la tostación del sulfuro doble, el óxido de níquel se reduce con una corriente de hidrógeno; seguidamente se coloca en un *volatilizador*, donde una corriente de óxido de carbono, a una temperatura de 400° C, transforma el níquel en níquel-carbonilo $Ni(CO)_4$. Este gas se descompone a 150° C: el níquel puro se deposita y el óxido de carbono vuelve a entrar en el circuito.

Metalurgia del aluminio. — El aluminio se obtiene por electrólisis de alúmina pura fundida. Para obtener alúmina pura, se parte de la *bauxita*, mineral cuyo constituyente principal es la alúmina, acompañada de óxido de hierro y sílice como impurezas. La bauxita existe en yacimientos importantes en Francia, cerca de Baux, de donde procede su nombre. Se trata en una autoclave la bauxita, a 160° C, con una solución concentrada de sosa; se forma un aluminato sódico soluble, AlO_2Na, que, por filtración, se separa de los residuos insolubles. Esta disolución se diluye luego en agua; el aluminato de sosa se hidroliza y precipita la alúmina hidratada:



$$AlO_2Na + 2H_2O \longrightarrow Al(OH)_3 + NaOH,$$

con tal de sembrar el baño con alúmina precipitada.

Esta alúmina se calcina y se mezcla con tres veces su peso de una mezcla de partes iguales de fluoruro cálcico y criolita (AlF_6Na_3), que sirve de fundente. Se funde la mezcla de los tres constituyentes y se electroliza a 900-950° C. Solamente se descompone la alúmina y da aluminio y oxígeno. El baño de alúmina y fundente debe ser de menor densidad que el aluminio fundido, a fin de proteger éste de la acción del aire. El cátodo lo constituye la cuba electrolítica, que está revestida de carbón aglomerado; el ánodo, que es de grafito, se quema por la acción del oxígeno desprendido en la electrólisis y produce óxido de carbono.

Aleaciones de aluminio. — Se utilizan grandes cantidades de aleaciones de aluminio en la industria aeronáutica y automovilística. Pueden distinguirse:

1° *Aleaciones de fundición*, que contienen principalmente cobre (10% como máximo) o magnesio, o incluso silicio (hasta un 12%), con pequeñas cantidades de hierro, cinc, níquel y manganeso, que son muy fluidas y permiten hacer buenas coladas;

2° *Aleaciones para laminado y trefilado*: contienen cobre, magnesio, silicio y, a veces, manganeso, pero en proporciones inferiores a las anteriores aleaciones; y además, cinc, níquel, cromo, bismuto, etc. Se les da el nombre de duraluminio. El alpax es una aleación con alta proporción de silicio: 11,5%.

Metalurgia del magnesio. — Aunque se hayan propuesto y utilizado diversos procedimientos, el magnesio se prepara, casi exclusivamente, por electrólisis del cloruro fundido. Como el metal se obtiene fundido, debe ser protegido del aire para evitar su inflamación.

El cloruro de magnesio se extrae de los yacimientos de carnalita (cloruro doble de potasio y magnesio) o del agua del mar. En este caso, se trata el agua del mar con cal, que precipita el magnesio como hidróxido. Éste, separado por filtración, da con ácido clorhídrico cloruro magnésico. La electrólisis de éste suministra, además del magnesio, cloro, el cual se utilizará para preparar el ácido clorhídrico necesario para la obtención del cloruro de magnesio. El metal industrial contiene 99% de magnesio, es más ligero que el aluminio, y por esto se emplea especialmente en aeronáutica.

Aleaciones de magnesio. — Las aleaciones de magnesio contienen de 3 a 10% de aluminio, de 0,5 a 3% de cinc y de 0,1 a 1,5% de manganeso.

Metalurgia de los metales preciosos. — El **oro** se halla en sus minerales en estado libre, pero tan dividido que hay que tratar una enorme cantidad de material para obtenerlo. La separación del metal se realiza mediante el empleo de disolventes: el mercurio en la *amalgamación*, y las soluciones acuosas de cianuros alcalinos en la *cianuración*. Los países más ricos en minerales de este metal son la Unión Sudafricana, la U. R. S. S., Canadá, Colombia y México.

Las arenas auríferas son arrastradas por un fuerte chorro de agua, y la mezcla corre por unos canales de madera cuyo fondo contiene un poco de mercurio; el oro es parcialmente retenido por éste. El resto, que queda en los barros residuales o *tailings*, se recupera por cianuración.

Si el mineral se halla en masas, se tritura y se trata seguidamente en unas mesas de amalgamación, a las cuales se da a veces un movimiento de bamboleo a fin de aumentar el contacto entre el mineral y el mercurio. Se raspa la mesa y se destila la amalgama para separar el oro y recuperar el mercurio.

La pulpa procedente de la amalgamación se somete a un tratamiento de cianuración con una solución diluida de cianuro potásico; cuando todo el oro se ha disuelto, se filtra la pulpa en filtros continuos para obtener una solución, de la cual puede separarse fácilmente el metal precioso, ya sumergiendo limaduras de cinc (el oro es precipitado y el cinc se disuelve), ya sometiéndola a una electrólisis con ánodos insolubles. Los ánodos son de hierro y los cátodos de plomo cubiertos de óxido de plomo PbO_2. El oro depositado es fundido con el plomo y el todo sometido a la copelación.

La cianuración sólo se utiliza para el tratamiento de las pulpas residuales de la amalgamación, pues la disolución de granos gruesos por este procedimiento exigiría demasiado tiempo.

La **plata,** de la que el primer país productor es México, se obtiene de sulfuro, o de residuos de la metalurgia del plomo o el cobre. El sulfuro, tostado en un horno de reverbero, se transforma en sulfato, que pasa al estado de cloruro durante una segunda tostación realizada después de su mezcla con sal común. Por lavado con agua, se disuelven los cloruros solubles; después se tratan con una solución acuosa de hiposulfito sódico para disolver la plata, que es precipitada a continuación como sulfuro, de donde se separa el metal precioso por medio del mercurio: se obtiene una amalgama que se destila para recuperar el mercurio.

También puede pulverizarse el mineral y ser tratado con una solución acuosa de cianuro sódico que disuelve el metal al estado de cianuro doble, del que se precipita la plata al hacerlo pasar sobre limaduras de cinc.

El oro y la plata se afinan por electrólisis con cátodos y ánodos horizontales de los cuales los primeros son de grafito y los segundos constituidos por el mineral que se ha de refinar.

Ensayos habituales en metalurgia

Los métodos que permiten determinar la constitución y las propiedades de los productos metalúrgicos se dividen en cuatro clases:

1° **Ensayos físicos,** que comprenden el análisis térmico, la dilatometría, la conductibilidad eléctrica o térmica, el magnetismo y el examen por rayos X.

El *análisis térmico* consiste en estudiar las curvas de calentamiento o de enfriamiento de los productos puestos a temperatura elevada para determinar los puntos de fusión y de transformación. Hay estrechas relaciones entre la forma de los diagramas y la constitución de los productos metalúrgicos.

La *dilatometría* permite descubrir anomalías que frecuentemente el análisis térmico no indica. Estudiando la variación de la dilatación según la temperatura en una serie de aleaciones descubrió Ch. Guillaume el invar.

El estudio de la *conductibilidad térmica* en función de la composición o de la temperatura permite apreciar la calidad de los conductores o de las resistencias eléctricas.

El *magnetismo* revela algunas transformaciones (punto de Curie).

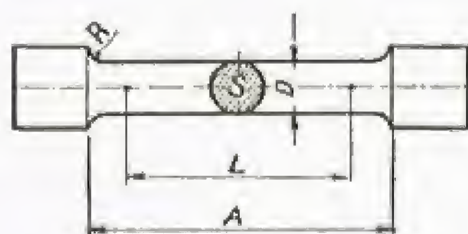
El *examen por rayos X* muestra algunos defectos (soldaduras) y permite estudiar la red cristalina de los productos metalúrgicos.

2° **Ensayos fisicoquímicos,** que comprenden la metalografía (micrografía y macrografía).

La *micrografía* tiene por objeto descubrir los constituyentes de un producto metalúrgico. Se ataca el producto con un reactivo, que permite diferenciar los constituyentes, y se examina por reflexión en el microscopio.

La *macrografía* es el examen ocular de la organización estructural, de la heterogeneidad y de los defectos de un producto metalúrgico (impurezas de los productos siderúrgicos reveladas por impresión sobre el producto de un papel bromurado sumergido en ácido sulfúrico).

3° **Ensayos mecánicos,** que comprenden el ensayo de tracción, el ensayo de choque y el ensayo de dureza.



Probeta de tracción normalizada

Acero				
D	S	L	R	A
13,8	150	100	10	126
9,8	75	70	6	90
4	12,5	30	6	38
1,5	6,8	6,8		9

El *ensayo de tracción* consiste en someter una probeta de forma y longitud determinadas a un esfuerzo de tracción que crece lentamente hasta producir la ruptura. Se define así el *límite elástico* o carga máxima que puede soportar el metal por milímetro cuadrado de sección sin experimentar deformación permanente.

El *ensayo de choque* utiliza unas probetas que tienen una entalladura en la cara opuesta al punto de choque a fin de romperlas de un solo golpe.

Se llama *resiliencia* el número de kilogramos necesario para producir la ruptura de la probeta en cada centímetro cuadrado de la sección entallada.

El *ensayo de dureza* determina la resistencia a la penetración. El método más corriente es el de la bola de Brinell, que, bajo una carga determinada, imprime una huella esférica en el metal: midiendo esta huella se obtiene la dureza del cuerpo. Existen otros ensayos de dureza: esclerómetro de Martens, escleroscopio, punta de diamante, péndulo, etc.

En las fundiciones se efectúan algunas veces ensayos de *compresión* y de *cizalladura.*

4° **Ensayos químicos,** que tienen por finalidad estudiar la corrosión sometiendo a baños apropiados el producto. Se mide la pérdida de peso o la alteración de las propiedades mecánicas causada por la inmersión.

Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos sirven para mejorar las propiedades mecánicas de los metales y aleaciones a fin de hacerlos más aptos para realizar un trabajo determinado.

Se distinguen tres clases de tratamientos térmicos: tratamientos de regeneración o *recocido,* tratamientos de estabilización de un estado molecular o *revenido,* y finalmente el *temple.* A estos tratamientos se añade a veces la *cementación* y la *nitruración.*

Temple. — El temple consiste en enfriar un cuerpo más o menos bruscamente después de haberlo puesto a una temperatura bastante elevada. En principio, el temple de los metales es aplicado sobre todo a los aceros. El metal se calienta previamente por encima de 900° C, y después se sumerge en agua, aceite, etc. Con el temple, el acero se hace duro y elástico. El temple se realiza de forma diferente según la calidad del acero sobre el cual se trabaja y según las propiedades que se desean obtener. Una aleación puede presentar diferentes estados moleculares según la temperatura a que sea mantenida; el enfriamiento brusco mantiene la estructura adquirida en caliente, de modo que el temple de una aleación puede modificar sus propiedades: el acero al carbono se hace más duro; por el contrario, el bronce y los aceros inoxidables se ablandan. Se obtiene un *temple enérgico* con agua fría o solución al 5% de cloruro sódico (se usa especialmente en aceros al carbono). Para el *temple suave* se emplea *aceite vegetal,* animal o mineral (suele aplicarse a piezas complicadas o aceros especiales).

Revenido. — Tiene por objeto hacer desaparecer del seno de un metal las tensiones internas que se producen después de una transformación radical como la originada por el temple.

El acero templado es muy frágil. Si se calienta de nuevo a una temperatura inferior a la del temple (200-300° C) y se deja enfriar lentamente, disminuye su fragilidad y su dureza se mantiene. El revenido al amarillo paja (210° C) y al amarillo obscuro (240° C) se emplea en las herramientas. El revenido al violeta púrpura (265° C), en los sables y espadas, que deben ser menos frágiles. El revenido al violeta azul (290° C), en los resortes.

Recocido. — El temple se destruye por un calentamiento a alta temperatura seguido de un enfriamiento lento; el acero ordinario se regenera.

Frecuentemente, los tratamientos mecánicos acarrean cambios en las propiedades del metal (metal martillado o batido). Para que recupere la homogeneidad, se verifica un recocido, generalmente después de cada operación metalúrgica.

Cementación. — En sentido general, el término cementación se puede aplicar a toda difusión de un elemento en una pieza de metal mantenida en estado sólido. En la práctica, para los aceros tiene por objeto la transformación de un hierro o un acero dulce, que contienen poco carbono, en un acero ordinario o acero duro, que tiene más.

Esta operación se lleva a cabo calentando en hornos especiales o en crisoles las piezas que se han de cementar, en presencia de un carburante enérgico (carbón de madera pulverizada). La cementación es superficial. Se aplica a piezas cuya superficie debe ser dura y cuyo conjunto debe conservar su maleabilidad y su elasticidad (álabes, engranajes, etc.).

A veces se emplean cementos compuestos de diferentes materias carburantes. Se cubren las piezas con el cemento, se colocan en cajas de fundición y se dejan en un horno calentado al rojo vivo de doce a veinticuatro horas. Las piezas se extraen después y se templan si se desea.

Los elementos especiales modifican, según los cementos, la velocidad de cementación. El silicio y el aluminio la retrasan y pueden incluso detenerla.

Nitruración. — La nitruración es un tratamiento de endurecimiento superficial de algunos aceros por exposición en una atmósfera de nitrógeno en condiciones determinadas.

Los aceros que admiten la nitruración son los que contienen poco cromo y aluminio.

La nitruración se verifica en una atmósfera nitrada, a temperaturas relativamente bajas (500° C), y no produce ninguna alteración en las propiedades mecánicas de las piezas tratadas. Además de adquirir la dureza superficial, las piezas nitruradas resisten a la oxidación, y de ahí su empleo en automóviles y aviación.

Industrias orgánicas

Grasas

Definición. Clasificación. Industria de los aceites y grasas. Hidrogenación de los aceites. Margarinas

Definición. — Las grasas están constituidas por ácidos orgánicos de largas cadenas que contienen de 4 a 22 átomos de carbono en su molécula, combinados en forma de ésteres con la glicerina. En las substancias grasas naturales no se encuentran más que ácidos grasos con un número par de átomos de carbono. Los principales ácidos encontrados en las substancias grasas son los ácidos butírico, palmítico, esteárico, oleico y linoleico.

La alimentación consume la mayor parte de las substancias grasas, pero la fabricación de jabones y detergentes, así como la de pinturas, absorben también grandes cantidades; las grasas constituyen, además, la única fuente importante de glicerina, necesaria para la fabricación de materias plásticas y explosivos; finalmente, las substancias grasas se utilizan en la fabricación de velas y en la preparación de pomadas farmacéuticas y productos de belleza.

Clasificación. — Existen cuerpos grasos vegetales y cuerpos grasos animales, y, dentro de cada una de estas clases, los productos sólidos o grasas y los productos líquidos o aceites. Éstos se clasifican en no secantes, semisecantes y secantes. Un aceite es llamado secante si, dejado al aire, absorbe el oxígeno, se espesa e incluso se hace sólido con el tiempo. He aquí la tabla de las principales substancias grasas:

Substancias grasas vegetales	Sólidas		Manteca de cacao, sebo vegetal de China, sebo de Borneo
	Semisólidas		Aceite de nuez de coco, de palmiche, de palma
	Líquidas	No secantes	Aceite de oliva, de cacahuete, de ricino, de colza, de nabo
		Semisecantes	Aceite de algodón, de sésamo, de maíz, de girasol
		Secantes	Aceite de soja, de cártamo, de clavel, de hevea, de linaza, de madera de China (aceite de tung)
Substancias grasas animales	Sólidas		Manteca de vaca, de cerdo y de otros animales, sebos, grasas de huesos, grasa de lana
	Líquidas		Aceite de pezuñas, aceite de arenque, de sardina, de ballena, de foca

Industria de los aceites y grasas. — Se utilizan tres procedimientos para extraer las substancias grasas de los tejidos vegetales o animales que las contienen. Puede hacerse por simple fusión, en seco o en presencia de agua: el calor hace estallar las células y el aceite o la grasa fundida se separa de las impurezas por su distinta densidad. Este procedimiento de fusión es el más empleado en las substancias grasas de origen animal (exceptuadas las mantecas). Las grasas y aceites vegetales suelen obtenerse por presión, en frío si se trata de un aceite, y en caliente en el caso de una grasa. La presión hace explotar las células y la substancia grasa se derrama. La extracción por disolventes da mejores rendimientos. El procedimiento consiste en someter la materia prima, previamente reducida a polvo, a la acción de un disolvente de las substancias grasas. Se filtra luego para separar la disolución de los residuos vegetales, y el disolvente se recupera por destilación y vuelve a entrar en el proceso. Como la operación se puede repetir muchas veces, se llega a extraer la casi totalidad de las substancias grasas, lo que no se consigue por simple presión. Los disolventes empleados son la gasolina, el tricloroetileno y el sulfuro de carbono. La disolución de las substancias grasas se efectúa en caliente.

Las grasas obtenidas por presión son de más calidad que las obtenidas por extracción con disolventes, y por eso se destinan a fines alimenticios. Las tortas prensadas se vuelven a prensar frecuentemente a presiones más elevadas, y se obtiene así un aceite de inferior calidad. Generalmente se combinan ambos procedimientos, para lo cual se someten a extracción con disolventes los residuos de la presión. Los residuos de extracción se utilizan como alimento para el ganado (tortas de cacahuete) o como abonos (tortas de pescado).

Las grasas y aceites extraídos por cualquiera de los procedimientos anteriores han de someterse, especialmente si se destinan a la alimentación, a un refinado o purificación. La *coagulación* tiene por objeto precipitar los mucílagos y otras impurezas contenidas en el aceite o en la grasa, y se realiza por calefacción en presencia de agua y decantación o centrifugación. La *adsorción* elimina las impurezas más pequeñas y gran parte de la coloración; consiste en filtrar las substancias grasas sobre tierra decolorante o carbón activo. El *refinado alcalino* elimina los ácidos grasos, no combinados con la glicerina, mediante una disolución débilmente básica. La *desodorización* se verifica en el vacío inyectando vapor de agua en la substancia grasa. En algunos casos, estos tratamientos de purificación se completan con un blanqueamiento químico por medio de cloruros decolorantes u otros productos.

Hidrogenación de los aceites. — Las substancias grasas líquidas son más abundantes que las sólidas; sin embargo, la demanda de éstas es mayor que de aquéllas. Por ello se han tratado de transformar los aceites en grasas, lo que se ha conseguido muy fácilmente por hidrogenación. El ácido oleico, en presencia de catalizadores, ordinariamente a base de níquel, se combina con el hidrógeno a presiones de 5 a 10 kilogramos por centímetro cuadrado y da ácido esteárico. Las substancias grasas con una elevada proporción de ácido oleico son líquidas, mientras que las que contienen sobre todo estearatos son sólidas. Se puede, pues, por hidrogenación, llegar a un aceite de la consistencia deseada. La hidrogenación se utiliza mucho en la fabricación de margarinas.

Margarinas. — Las margarinas son grasas o aceites a los que se da, por distintos procedimientos, la consistencia de la manteca de vaca. La primera margarina se obtuvo en 1870, en Francia, por Mouriès, tratando sebo de buey con jugos gástricos y pancreáticos de cerdo en presencia de una disolución débilmente alcalina. Actualmente, se obtiene la margarina por fermentación parcial de substancias grasas, emulsionándolas con leche ligeramente agria. Las substancias empleadas son sebos y manteca de cerdo de primera calidad, así como aceites vegetales parcialmente hidrogenados.



Vista de conjunto de una fábrica de margarina: *al fondo, a la izquierda*, tambores refrigeradores destinados a endurecer la emulsión cremosa; *en el plano central*, laminadores para dar a la margarina la plasticidad deseada; *en primer plano*, vagonetas con la margarina acabada, lista para ser empaquetada *(Doc. Astra)*

Jabones. Velas. Glicerina

Jabones: Definición. Jabón común. Jabón blanco. Jabones de empaste. Jabones blados. Jabones de tocador. Detergentes y productos espumantes. — **Velas.** — **Glicerina**

Jabones

Definición. — Los jabones son las sales sódicas (jabones duros) o potásicas (jabones blandos) de los ácidos grasos. Se obtienen por acción, en caliente, de la sosa (o la potasa) sobre las substancias grasas. Los ácidos se combinan con el álcali y se libera la glicerina. Ésta se separa de los jabones por medio de agua salada, en la cual los jabones son insolubles y la glicerina soluble. Estas disoluciones acuosas se tratan por separado para extraer la glicerina (v. GLICERINA).

La propiedad de limpiar que poseen los jabones procede del hecho de que disminuyen la tensión superficial del agua y permiten así la emulsión en ella de la "suciedad" de los cuerpos que se quiere limpiar.

Las materias primas empleadas en la fabricación de jabones son aceites o grasas, "pastas de refinado alcalino", que prácticamente son jabones, o ácidos grasos libres obtenidos por hidrólisis de substancias grasas (v. GLICERINA). Para obtener productos totalmente blancos, algunas veces se destilan los ácidos grasos bajo un vacío prolongado. Si se utilizan ácidos grasos libres, la fabricación de jabón se reduce a una neutralización exacta de esos ácidos con sosa, fusión y moldeo de la pasta.

Algunos ácidos, especialmente el ácido láurico, dan jabones de alta calidad. El aceite de coco da jabones consistentes y que hacen mucha espuma, lo que no es extraño, pues contiene el 48% de ácido láurico.

Jabón común. — Las materias primas utilizadas para este jabón son el sebo, aceites vegetales y lejías alcalinas.

Se vierte sobre la lejía (carbonato sódico y cal), a una concentración de 10° Be y en caliente, la mezcla de substancias grasas. De vez en cuando se le hacen pequeñas adiciones de lejías de una concentración de 12-15° Be y se mantiene la ebullición durante 18 ó 20 horas. Después de ocho horas, se añade sulfato de hierro o alquitrán de hulla para darle el jaspeado. Por agitación, se emulsiona toda la masa, lo que realiza el *empaste*, que permite la acción posterior de lejías concentradas sobre la masa dispersa. Preparada la emulsión, se añade agua salada; el jabón no se disuelve en el agua salada y sobrenada. Por decantación, se separa la glicerina. La saponificación queda terminada hirviendo la emulsión con una lejía concentrada; la masa hervida se vierte en moldes, donde se solidifica (8 a 10 horas); después de su desecación con aire caliente, se corta el jabón en barras de cinco kilogramos y se le pone la marca con un troquel.

La fabricación de este jabón da una idea general de la marcha seguida en la preparación de otros jabones.

Jabón blanco. — En este jabón no se introduce ninguna sal de hierro. Las materias grasas en fusión se mantienen calientes durante mucho tiempo, en contacto con una lejía diluida: las impurezas son disueltas. Y poco a poco se forman tres capas: la espuma, el jabón blanco depurado y el graso.

Para la solidificación, el jabón blanco se vierte en unos moldes o marcos de poco espesor.

Jabones de empaste. — Estos jabones son simples jaleas de jabón expresamente solidificadas que contienen agua, glicerina, sales y la disolución alcalina sobrante de la saponificación. Se emplean para obtenerlos aceites de copra o de palmiche. La substancia grasa se mezcla con una lejía sódica de 35-36° Be.

En los *jabones para uso doméstico* se añade a veces como relleno carbonato sódico, bórax o silicato sódico.

Los *jabones mixtos* se obtienen mezclando jabón de sebo y jabón de copra con adición de alquitrán de hulla.

Jabones blandos. — El contenido medio en ácidos grasos de estos jabones es de un 35 a un 40%. Son verdes (por predominio del aceite de pescado) o negruzcos (coloración debida a un poco de índigo) y de consistencia más o menos viscosa. Para prepararlos se utilizan lejías de potasa, con las que se saponifican aceites de linaza, adormidera, cáñamo y colza, grasas de la lana y aceites de sebo. Se procede lo mismo que en los jabones de empaste.

Estos jabones se emplean en la industria textil y en el lavado doméstico. Las otras industrias emplean jabones económicos de resina.

Jabones de tocador. — La saponificación debe ser perfecta; el álcali enteramente neutralizado, y la solubilidad en agua completa. Las materias primas para la fabricación de estos jabones se preparan por saponificación directa de la axungia o de mezclas de sebo y aceite de coco. Al final del proceso se añade el colorante (a base de anilina) y el perfume. También pueden fabricarse en frío partiendo de jabones duros comunes, que se trituran en molinos mezcladores al tiempo que se añaden los perfumes y los colorantes, después de lo cual se pasa el todo por unas potentes prensas. El jabón sale de ellas en forma de una barra larga y continua, que se corta en trozos: las pastillas. En éstas, con un troquel, se acuña la marca de fábrica.

Los jabones líquidos son mezclas de jabón y agua con un poco de alcohol; los jabones transparentes se obtienen por evaporación de una disolución alcohólica de jabón o añadiendo glicerina.

Detergentes y productos espumantes. — Algunos alcaloides del grupo de las saponinas tienen la propiedad de dar soluciones acuosas que forman mucha espuma; frecuentemente estas soluciones se utilizan en lugar del jabón. En los últimos años, la industria ha obtenido



Dama en su tocador (siglo XVI) [*Fot. Larousse*]

varias substancias que, aun cuando son diferentes químicamente de las saponinas, tienen propiedades análogas: los detergentes sintéticos. Éstos poseen la ventaja, con respecto a los jabones, de no formar con las aguas calcáreas sales cálcicas insolubles. Hacen espuma, pues, en las aguas más duras, e incluso en el agua del mar; en resumen, limpian mejor que los jabones.

Los detergentes sintéticos son de dos clases: unos se obtienen por acción del ácido sulfúrico sobre un alcohol de cadena larga, frecuentemente el alcohol láurico, seguida de una neutralización con carbonato sódico. (En esta misma clase se colocan los productos obtenidos por fijación de ácido sulfúrico sobre ciertos hidrocarburos del petróleo, seguida de una neutralización.) Los otros son las sales de amonio cuaternarias, es decir, substancias semejantes a las sales de amonio, pero en las cuales los cuatro átomos de hidrógeno son reemplazados por radicales orgánicos. Estas sales de amonio cuaternarias poseen, además de sus propiedades detergentes, una importante acción bactericida. Una de ellas produce la muerte del estafilococo en 10 minutos, y ello a la débil concentración de una parte por 600 000 de agua.

Velas

Antiguamente se utilizaban para el alumbrado las grasas sólidas en forma de candelas, que se preparaban empapando mechas en sebo fundido. Milly y Chevreul preconizaron, en 1824, el empleo del ácido esteárico; éste, mezclado frecuentemente con parafina, constituye hoy el componente más importante de las velas.

Se saponifica el sebo en presencia de cal, o en autoclave en presencia de ácido sulfúrico, o, a veces, primero con cal y después con ácido sulfúrico. Se separan por presión los ácidos margárico y esteárico del ácido oleico y se vierte la mezcla de ácidos grasos sólidos en moldes metálicos, en cuyo centro hay una mecha de algodón trenzado, impregnada en ácido bórico.

También se fabrican velas de parafina.

Glicerina

La glicerina se obtiene a partir de las aguas glicéricas procedentes de la fabricación de jabones o a partir de las soluciones más concentradas que da la hidrólisis de las substancias grasas. Este último procedimiento consiste en calentar en autoclave las substancias grasas en presencia de agua y un catalizador (corrientemente la cal). Se liberan los ácidos

grasos, y finalmente se obtiene una disolución acuosa de glicerina y ácidos grasos. Éstos se emplean en la fabricación de jabón.

Las soluciones de glicerina deben ser purificadas por filtración y, a veces, por tratamientos con sosa o ácido sulfúrico; seguidamente se evaporan a presión reducida hasta obtener una concentración en glicerina del 80%. La glicerina al 80% es la glicerina industrial. La glicerina empleada en la fabricación de la dinamita y de resinas gliceroftálicas se obtiene por destilación de la glicerina industrial a presión reducida. Finalmente, la glicerina farmacéutica se obtiene de la calidad anterior destilándola una vez más.

Fuera de las aplicaciones citadas anteriormente, la glicerina se emplea en la fabricación de celofán, barnices, resinas y gomas de mascar.

Se ha desarrollado posteriormente un procedimiento sintético a partir del propileno obtenido en el cracking de los petróleos, que ha venido a completar el método de fabricación a partir de los subproductos del jabón, el cual está siempre supeditado a la fabricación de éste.

Pinturas y barnices

Definición. Composición y clasificación de las pinturas. Pinturas al agua. Pinturas al aceite. Pinturas sintéticas. Pigmentos utilizados en pintura. — **Barnices**

Definición. Composición y clasificación de las pinturas. — Las pinturas son productos destinados a cubrir las superficies con vistas a su protección y decoración.

Una pintura contiene aglutinante, pigmentos o lacas y un disolvente volátil (diluyente).

El aglutinante puede estar constituido por cal, almidón, aceites secantes o resinas naturales o artificiales.

Los pigmentos son productos coloreados, sólidos, insolubles en el agua y los disolventes orgánicos; generalmente son productos minerales. Las lacas se obtienen por la adsorción de una materia orgánica colorante en un soporte mineral (alúmina o sulfato de bario).

El diluyente o disolvente, siempre volátil, es agua en el caso de las pinturas a la cal o al almidón, y un disolvente orgánico en los otros casos.

Pinturas al agua. — Las pinturas al agua son pinturas baratas obtenidas mezclando una lechada de cal (pinturas a la cal) o almidón (pinturas a la cola) con pigmentos generalmente de poco precio. Por evaporación del agua, la cal o el almidón mantienen el pigmento en la superficie pintada. Estas pinturas se utilizan únicamente en la decoración interior, pues no aseguran protección alguna contra la corrosión, dado que son afectadas por la humedad y el agua.

Pinturas al aceite. — En estas pinturas, el aglutinante está constituido por un aceite secante, el cual, por la acción del oxígeno del aire, se transforma poco a poco en una masa sólida más o menos dura. La propiedad secante de los aceites es debida a una fijación del oxígeno en los enlaces etilénicos de los ácidos grasos que entran en su composición. Este fenómeno no está aún totalmente esclarecido. En las pinturas al aceite, después de la evaporación del disolvente, queda una capa de aceite que retiene el pigmento. Esta capa se transforma poco a poco, por secado, en una película sólida impermeable al agua y a los gases, lo que asegura una protección eficaz de las superficies pintadas.

Los principales aceites empleados en pintura son el aceite de linaza, el aceite de tung o aceite de madera de China, el aceite de ricino deshidratado y los aceites de pescado. Para aumentar la rapidez de oxidación de los aceites, es decir, del secado de la pintura, se añaden pequeñas cantidades de productos llamados "secantes" (de 0,1 a 0,5%); éstos son sales de plomo, de cobalto o de manganeso, y, ordinariamente, resinatos o linoleatos.

En las pinturas al aceite, los diluyentes o disolventes más empleados son la esencia de trementina y el "white spirit", o una mezcla de ambos. La composición de estas pinturas es bastante variable; oscila entre 20 y 40% de aceite, 40 y 70% de pigmentos y 30 y 40% de disolvente.

Pinturas sintéticas. — Estas pinturas se preparan añadiendo pigmentos a una solución de una resina sintética. Evaporando el disolvente, queda una capa dura de resina que fija el pigmento, permite su adherencia a la superficie pintada y protege ésta contra la corrosión.

Se utilizan numerosas resinas en la fabricación de pinturas; las principales son las resinas gliceroftálicas y maleicas, la nitrocelulosa y los acetatos de celulosa y las resinas de cumarona y de indeno (v. PLÁSTICOS Y RESINAS ARTIFICIALES, p. 364).

El disolvente varía con la resina utilizada. Existen pinturas mixtas con varias resinas o con mezclas de resinas y aceites secantes. También se utilizan resinas de brea de hulla o de petróleo (pinturas al alquitrán).

Pigmentos utilizados en pintura. — Algunos de los pigmentos utilizados en pintura son productos naturales: ocres y hierro micáceo (óxidos de hierro), blanco de barita (sulfato de bario), pero la mayor parte son obtenidos industrialmente. Los principales son los siguientes:

Pigmentos blancos: Blanco de cinc (óxido de cinc); blanco de titanio (óxido de titanio); litopón (mezcla de sulfuro de cinc y sulfato de bario);

Pigmentos amarillos: Amarillo de cromo (cromato de plomo); amarillo de cinc (cromato de cinc);

Pigmentos azules: Azul de Prusia (ferrocianuro férrico); azul de ultramar (que se obtiene calcinando una mezcla de caolín, azufre y carbonato sódico);

Pigmentos diversos: Negro de humo, minio (óxido de plomo); polvo de aluminio; polvo de bronce.

Para que puedan ser utilizados en pintura, los pigmentos deben ser molidos muy finamente; el tamaño de los granos debe ser del orden de cinco centésimas de milímetro. Al mezclar los pigmentos con el aceite o la disolución de resina pueden formarse grumos; éstos se destruyen pasando las pinturas por unas laminadoras.

Barnices

Los barnices, de composición análoga a la de las pinturas, se diferencian de éstas en que no contienen pigmentos, sino únicamente colorantes solubles en el diluyente o el aceite. Los barnices son, pues, transparentes, mientras que las pinturas son opacas.

Los barnices pueden agruparse en dos clases generales: barnices al aceite y barnices al alcohol. Los barnices al aceite son soluciones de una o más resinas, sintéticas o naturales, en un secante y con un disolvente volátil. El aceite hace más consistente la película de resina. Los barnices al alcohol son igualmente soluciones de resinas, pero el disolvente es completamente volátil y no forma películas. Entre las resinas naturales pueden citarse el copal, la goma dammar, la colofonia y la goma laca. Las resinas artificiales son las mismas que se utilizan en las pinturas; las más resistentes son las de cumarona-indeno, las de urea-formaldehído y las de melamina.

Industrias de la celulosa

Definición de la celulosa. — **El papel:** Pastas de papel. Celulosa de trapos. Celulosa de madera: Pasta mecánica. Pastas al bisulfito. Pastas a la sosa y al sulfato. Procedimientos al cloro. — **Fabricación del papel**

Definición de la celulosa. — La celulosa es una substancia blanca, de fórmula $(C_6H_{10}O_5)_n$, que las más de las veces se presenta en forma de fibras. Es el constituyente universal de la pared celular de los vegetales. Generalmente, la celulosa está asociada en la planta con otros productos; en estado puro no se encuentra más que en el algodón.

La celulosa procedente del lino, el cáñamo, el ramio, el yute o el algodón se ha utilizado primeramente para fabricar hilos y tejidos. Después se ha empleado en la fabricación del papel, pero las exigencias de esta industria han hecho necesario buscar nuevas fuentes de celulosa. Éstas se han encontrado en la madera, la paja, el esparto, etc. La madera es la fuente principal; el 90% de la producción mundial de papel procede de ella.

El empleo de la celulosa en la fabricación de tejidos artificiales (rayón, seda al acetato (v. FIBRAS ARTIFICIALES, p. 366), ha hecho aumentar considerablemente las necesidades mundiales de celulosa, mientras que las de la industria del papel han permanecido casi estacionarias en los últimos años. Por ello se realizan esfuerzos con objeto de aumentar las existencias en madera para la industria mediante el cultivo de bosques compuestos de árboles de crecimiento rápido.

La celulosa se emplea, además, en la fabricación de explosivos (v. p. 362) y de diferentes materias plásticas (v. p. 364): celuloide, ésteres de la celulosa y éteres de la celulosa.

Aquí trataremos únicamente de las industrias de extracción de la celulosa y fabricación del papel.

El papel

El papel es una materia afieltrada constituida por un entramado de fibras de celulosa. Se prepara este entramado depositando fibras celulósicas, en suspensión en agua, sobre una tela metálica fina. El agua

escurre a través de la tela mientras que las fibras se depositan en ella y forman el entramado. Una vez prensado y secado, este entramado constituye el papel.

Pastas de papel. — Las fibras de celulosa suspendidas en agua son la *pasta de papel*. Se distinguen entre ellas las obtenidas por simple dispersión mecánica de la celulosa pura en agua (pasta de trapos o de celulosa impura, pasta mecánica y pasta de papeles viejos), y las pastas químicas, que se obtienen eliminando, con reactivos químicos apropiados, los otros constituyentes de la materia prima.

Las pastas pueden ser blanqueadas o utilizadas tal como se obtienen. Como agentes de blanqueo suelen utilizarse el cloro o hipocloritos. Finalmente, las pastas pueden ser empleadas inmediatamente para fabricar el papel o secadas y vendidas a las fábricas de papel. En este caso, la pasta se filtra por un filtro cilíndrico giratorio y a continuación se prensa y se seca.

La dimensión y forma de las fibras de celulosa varía según su origen. Una y otra tienen gran importancia para la calidad del papel. Ciertas fibras son muy largas y anchas, como la del ramio (200 mm de longitud y 0,04 mm de anchura), y la del algodón (30 mm de longitud y 0,03 mm. de anchura); otras son largas y delgadas, como la del lino y el cáñamo (25 mm de longitud y 0,018 mm de anchura), o pequeñas, como la del esparto (1,5 mm de longitud y 0,013 mm de anchura).

Las fibras procedentes de maderas resinosas son relativamente largas (5 mm) y anchas (0,06 mm), mientras que las procedentes de especies frondosas son cortas (1,5 mm de longitud) y estrechas (0,03 mm).

Las propiedades y el aspecto de estas fibras son distintos. Las del algodón se presentan en forma de tubos aplastados; son sólidas, flexibles y absorbentes. Las del lino y el cáñamo tienen paredes más gruesas y nudos. Son, pues, más sólidas y más duras que las del algodón. Las fibras de esparto, cortas y lisas, dan papeles flojos, blandos y suaves. La celulosa de paja, cuyas fibras son más largas y más gruesas, contribuyen a producir papeles sonoros y duros.

Entre las fibras celulósicas de la madera, las de las especies coníferas son las más buscadas y abundantes. Estas fibras, largas y flexibles, permiten fabricar una gran variedad de papeles resistentes. Las de las especies frondosas, más pequeñas y menos resistentes, se mezclan con las anteriores para dar al papel flexibilidad, opacidad y tersura superficial.

Celulosa de trapos. — La primera celulosa empleada en papelería se obtenía de los tejidos usados o trapos (lino, cáñamo y algodón), única materia prima utilizada hasta mediados del siglo XIX.

Hoy, esa celulosa se reserva para la fabricación de papeles de calidad o destinados a usos especiales.

Los trapos se venden clasificados por lotes, según su naturaleza, estado de conservación y color.

Para ser transformados en celulosa, se introducen los trapos, una vez deshechas las balas, en un *tambor rotatorio*. Este aparato sirve para batir y deshilachar los trapos, y deja caer a través de una rejilla de grandes mallas las impurezas pesadas.

A continuación se hace una especie de cernido que sirve para eliminar las materias extrañas, tales como botones, corchetes, cuero, etc., que los trapos podrían llevar adheridos.

Después se pasan los trapos por una *cortadora mecánica* que los reduce a pequeños trozos, aproximadamente de cinco centímetros.

Estos trozos son llevados por una correa sin fin hasta un recinto, donde se elimina el polvo con un ventilador, mientras que las impurezas pesadas se depositan por gravedad.

Además de todos estos tratamientos físicos, es preciso recurrir a tratamientos químicos para destruir o disolver la materia aglutinante de las fibras, las substancias grasas y los colorantes de los trapos. Esto se hace mediante una colada, es decir, un tratamiento con una lejía alcalina a presión de vapor.

Ordinariamente, la operación anterior se realiza en unos digestores rotativos, de forma cilíndrica o esférica, a una presión de vapor de 2 a 3 kilogramos por centímetro cuadrado, y dura de 10 a 15 horas.

Terminada la colada, los trapos se sacan del digestor para ser sometidos a otros tratamientos, que tienen por objeto eliminar, mediante un lavado, la lejía que los impregna y reducirlos a sus fibras elementales.

Estas dos operaciones se hacen simultáneamente en un aparato llamado *pila desfibradora*. Los trapos se introducen en la pila, en suspensión en agua, y son desmenuzados mediante unas láminas de acero situadas en un cilindro que gira, hasta que se obtiene una pasta finamente molida. Al mismo tiempo, esta acción mecánica facilita la expulsión de la lejía que impregna las fibras. Para evacuarla, se utiliza un tambor lavador. Éste, introducido en la pila, arroja fuera sin cesar el agua sucia que recoge a través de la tela metálica que cubre su periferia. Se introduce constantemente agua limpia por otra parte, y cuando el agua evacuada sale clara, el lavado se da por terminado. La duración del deshilachado varía según la dureza de los trapos, y debe darse por terminado una vez que están separadas las fibras.

Celulosa de la madera. — La mayor parte de la celulosa procede de la madera. Las maderas más utilizadas en la obtención de la celulosa son, entre las coníferas, el pino y el abeto, y entre las frondíferas, el álamo, el castaño, el chopo y el abedul. A esta lista hay que añadir el eucalipto y algunas plantas tropicales, como el parasol. Al margen de la celulosa obtenida de la madera, pueden citarse algunas plantas anuales también suministradoras de celulosa, por ejemplo la paja de los cereales y el esparto, que se tratan por procedimientos análogos.

Las pastas obtenidas de la madera pueden ser mecánicas o químicas. En las primeras, la separación de las fibras —muy incompleta— se hace por medios mecánicos. Las químicas proceden de un tratamiento de la madera, que disuelve las substancias ajenas a la celulosa, entre las cuales la principal es la lignina. Ésta es disuelta en agua por acción de bisulfito de cal o de sosa.

En las pastas de paja y esparto, se recurre a la acción de la sosa o a un ataque con cloro seguido de un lavado con pequeñas cantidades de pastas químicas.

Pasta mecánica. — Esta pasta se utiliza casi exclusivamente para la fabricación de papel de periódicos, mezclándola con pequeñas cantidades de pastas químicas.

Es de poca calidad, puesto que contiene todas las materias gomosas y resinosas de la madera de que ha sido extraída. Además posee poca consistencia y la fibra es corta, quebradiza y de forma irregular.

El color y la consistencia de los papeles fabricados con pasta mecánica son poco duraderos. Su fragilidad depende de la cantidad de cola resinosa que se ha puesto en ellos y de la acción de la luz y la humedad.

Para obtener la pasta mecánica se corta la madera con una sierra circular en trozos de unos 60 centímetros. Estos trozos son descortezados, ya por frotamiento mutuo en tambores rotatorios llenos de agua, ya por medio de descortezadoras constituidas por dos mesas giratorias provistas de cuchillas. A continuación se dividen los trozos en fragmentos de tamaño apropiado para el *desfibrado*. Éste se realiza frotando los trozos de madera con unas muelas que arrancan las fibras, mentos de tamaño apropiado para el *desfibrado*. Éste se realiza fro- De la cantidad de agua utilizada depende la temperatura a la cual se realiza el desfibrado. Si se usa mucha agua, se dice que la pasta es desfibrada en frío; las fibras son más finas y retienen mejor el agua sobre la rejilla de la máquina de papel. Del desfibrador, la pasta se lleva a los clasificadores, que retienen los nudos y las astillas de madera.

Pastas al bisulfito. — Por la acción del anhídrido sulfuroso, la lignina da origen a ácidos lignosulfónicos, solubles en agua. Tal es el principio de la fabricación de las pastas al bisulfito. En la práctica, no se utiliza el anhídrido sulfuroso, sino una solución acuosa de una mezcla de éste con bisulfito de cal, a fin de evitar la formación de ácido sulfúrico, que ennegrecería la pasta. La solución bisulfítica se obtiene por acción del gas sulfuroso sobre una lechada de cal, o introduciendo este gas en unas torres con revestimiento de caliza y regadas con agua. El anhídrido sulfuroso es producido por combustión de azufre o piritas.

Según la calidad de las pastas que se desea obtener, las soluciones bisulfíticas contienen de 3 a 4% de SO_2 libre y 1% de SO_2 en estado de bisulfito cálcico. Las pastas "duras" o que han perdido poca lignina exigen menos anhídrido sulfuroso que las pastas que la han perdido toda o las pastas fáciles de blanquear.

La preparación de los trozos de madera se realiza de la misma forma que para la pasta mecánica, pero estos trozos se reducen a virutas de una longitud entre 12 y 25 milímetros. Estas virutas deben ser clasificadas para eliminar las que son demasiado grandes, así como el serrín, que harían defectuosa la pasta que se trata de obtener.

Las virutas son introducidas en un digestor de acero, cuya capacidad es de 100 a 200 metros cúbicos y cuyo interior está revestido con ladrillos resistentes a los ácidos.

La temperatura de cocción es de 150° C como máximo, y la presión de vapor varía de 3 a 5 kilogramos por centímetro cuadrado. La duración de la cocción oscila entre 9 y 14 horas, y cuando ha terminado, se purga el aparato del anhídrido sulfuroso gaseoso. La pasta, mezclada con la disolución de ácidos lignosulfónicos, se envía a los difusores, donde se lava concienzudamente. A continuación, se separan por tamizado las partículas de madera no atacadas (crudas); después, se muele la pasta en unos molinos semejantes a los de aceite, donde pierde los granos de arena y otras impurezas que pueda contener. Luego se pasa la pasta por un tamiz; lo desechado por éste se envía al refinador, constituido por un cono móvil que gira en el interior de un cono fijo (v. *fig.* 34).

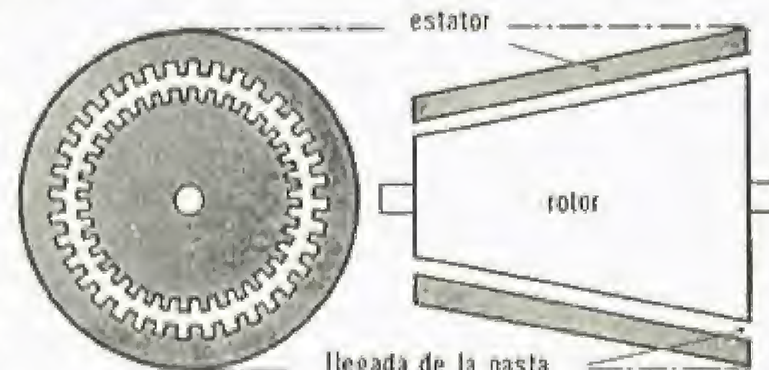


Fig. 34

Ambos conos están provistos en su periferia de láminas. La holgura o espacio entre los conos es muy pequeña, y el desfibrado de la pasta es enérgico. A la salida del refinador, la pasta es tamizada de nuevo. La pasta, cruda o blanqueada, es diluida a una concentración conveniente para la fabricación del papel (5 a 9 p. 1 000) o enviada a una prensa.

Los líquidos procedentes de la cocción se denominan "soluciones negras"; se desechan en la mayor parte de los casos. En algunas fábricas, sin embargo, se recuperan sea los ácidos lignosulfónicos, los azúcares fermentables, que se encuentran en pequeñas cantidades.

El procedimiento al bisulfito es el más empleado, pues es el que da mayores rendimientos; además, la pasta obtenida es fácil de blanquear. Su inconveniente es que no se puede emplear con determinadas maderas; la más utilizada es la del abeto.

Pastas a la sosa y al sulfato. — En estos dos procedimientos, es la sosa la que actúa sobre la lignina para hacerla soluble. El nombre de "procedimiento al sulfato" viene del hecho de que la materia prima empleada para preparar la solución de tratamiento es sulfato sódico, que es previamente reducido a sulfuro sódico. Por acción del agua, éste da sosa y ácido sulfhídrico.

En el procedimiento a la sosa, la concentración de sosa disminuye progresivamente durante la cocción; en el procedimiento al sulfato, por el contrario, es el sulfuro sódico el que va produciendo la sosa gradualmente, asegurando una concentración más constante de sosa. Las propiedades reductoras del sulfuro impiden, por otra parte, la oxidación y permiten obtener pastas más blancas. Pero aparte de estas diferencias



Máquina utilizada en papelería para desfibrar los leños *(Fot. Anthon y Söhne)*

Procedimientos al cloro. — Estos procedimientos se emplean sobre todo con las plantas herbáceas y, en particular, con la paja. Se fundan en la disolución de las materias incrustantes por medio del cloro, combinada con la acción de la sosa para disminuir los compuestos clorados. En general, el cloro y la sosa se obtienen por electrólisis del cloruro sódico.

El procedimiento más antiguo es el de **De Vains.** Se funda en una lixiviación en autoclaves, con sosa, de las materias celulósicas. Después de lavada, la pasta se trata con agua de cloro, en un aparato de marcha continua, y se somete después a la acción de una lejía sódica.

Este procedimiento ha perdido su importancia, puesto que requiere grandes cantidades de sosa, que no son recuperadas.

Pomilio puso a punto un método de tratamiento más enérgico, en el que se emplea cloro gaseoso. El vegetal se trata, a la presión atmosférica, con una solución alcalina diluida y caliente. Se elimina el exceso de solución alcalina y se lleva la pulpa a unas torres de cloruración, donde se somete a la acción del cloro gaseoso. El vegetal clorurado se lava seguidamente con agua, y después con una disolución alcalina diluida. La operación, desde la entrada de la materia prima hasta la salida de la celulosa, no se interrumpe. Este procedimiento tiene las ventajas de no necesitar autoclave, no emplear más que una pequeña cantidad de sosa (15 kg. por 100 de celulosa obtenida), que no ha de ser recuperada, y, finalmente, no exigir un gran consumo de vapor.

Fabricación del papel

Las diferentes pastas pueden ser empleadas solas o en mezcla para la fabricación de papel. En uno y otro caso, se coloca la pasta con agua en una cuba alargada de extremos redondeados, llamada *batidora* u *holandesa,* donde la masa sufre un intenso batido y es obligada a pasar entre láminas móviles y fijas de un rodillo.

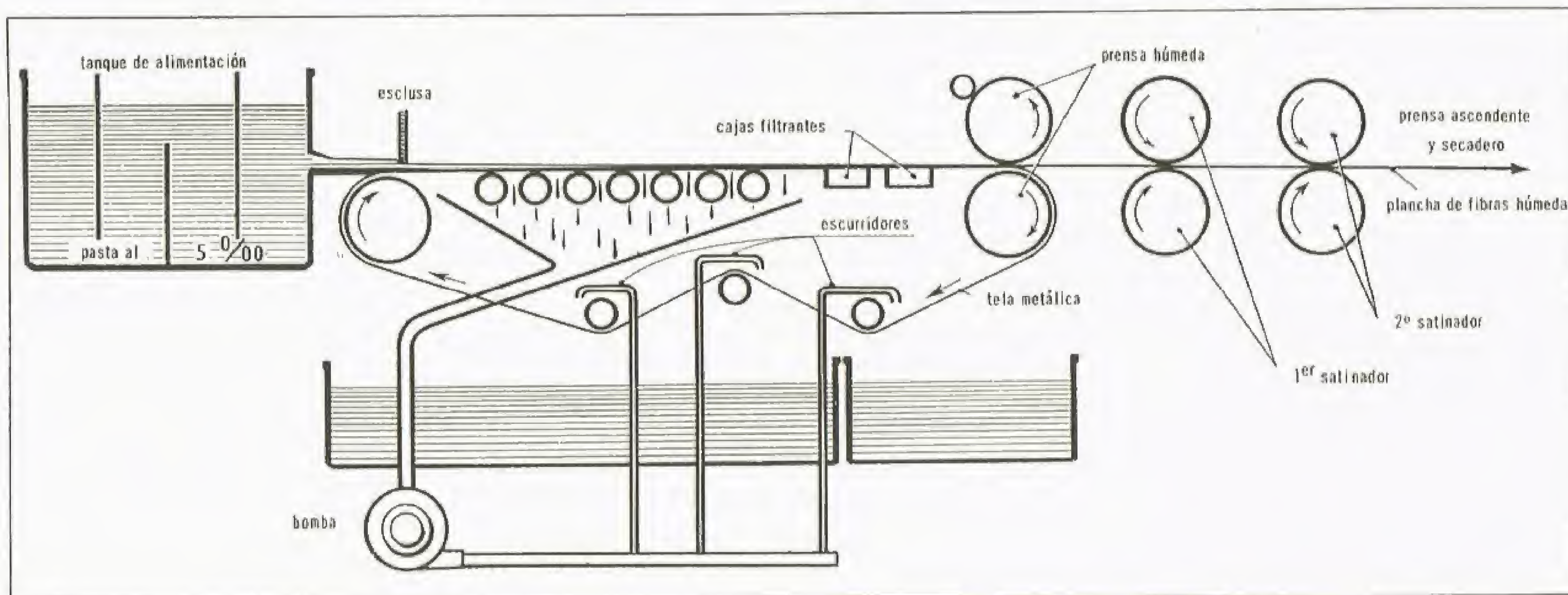


Fig. 35. — Esquema de una máquina de fabricación de papel

y de las que proceden de la recuperación de los reactivos utilizados, estos dos procedimientos se desarrollan del mismo modo.

La madera, preparada como se ha dicho en el caso de las pastas al bisulfito, se trata en unos autoclaves de acero o digestores. Unos son rotatorios, y otros fijos. Los primeros, de una capacidad de unos 25 metros cúbicos, giran sobre un eje horizontal, lo que asegura una buena agitación de la masa. Este mismo resultado se obtiene en los digestores fijos, un poco más grandes (60 m^3), haciendo circular la solución de ataque. La calefacción se hace inyectando vapor. La cocción dura varias horas a una presión de vapor de 4 a 6 kilogramos por centímetro cuadrado. Si se utiliza una cantidad pequeña de sosa, por ejemplo 15 kilogramos por 100 de madera, la lignina no se elimina por completo; la pasta queda algo coloreada, pero el papel que suministra es muy resistente: papel Kraft, empleado para la confección de los sacos de cemento. Con 20 kilogramos de sosa por 100 de madera se obtienen pastas fáciles de blanquear, pero el papel que éstas suministran es menos resistente. Una vez que la cocción ha terminado, la pasta se trata como en el procedimiento al bisulfito, con la diferencia de que las lejías del tratamiento se conservan para recuperar los reactivos que contienen.

En el procedimiento a la sosa, los líquidos negruzcos se concentran, y el residuo sólido obtenido, que es combustible a causa de su contenido en lignina, se quema en hornos fijos o secadores rotatorios. Así se obtiene una gran parte del calor que necesita la fábrica. Las cenizas, constituidas en su mayor parte por carbonato sódico, se disuelven en agua y se tratan con cal; se obtiene así una lejía de sosa cáustica que podrá ser utilizada en una nueva cocción.

En el procedimiento al sulfato, se actúa del mismo modo, pero para compensar las pérdidas de reactivos se añade, antes de la calcinación del residuo sólido procedente de los líquidos negros, sulfato sódico, reducido a sulfuro con la lignina. Las pérdidas de reactivos se compensan con el carbonato sódico en el procedimiento a la sosa.

Según la duración e intensidad de este tratamiento, así como según la clase de fibra, se obtienen distintas clases de papel. En la batidora se añaden los rellenos y los colorantes. En ella se practica también el encolado que impermeabiliza el papel y permite la escritura con tinta.

Desde las batidoras, donde está a una concentración de cerca del 6%, la pasta se lleva a una mezcladora, donde es diluida al 3% y algunas veces mezclada con otras pastas. Cuando se desea obtener buen papel, se hace pasar la pasta, batida y mezclada con los ingredientes necesarios, por la *afinadora,* que es un tipo especial de batidora. La pasta se diluye a una concentración que varía entre 1 y 0,5% y pasa después a la máquina. Dicha máquina (ver *fig.* 35) comprende un tanque de alimentación provisto de placas de separación para evitar los remolinos; a la salida del tanque se encuentra una esclusa que regula la cantidad de pasta que va a entrar en la máquina; a continuación hay una tela metálica sin fin a través de la cual se cuela la mayor parte de agua de la pasta, en tanto que las fibras son detenidas. Para activar el escurrimiento del agua, se colocan unas escurridoras o cajas filtrantes debajo de la malla en el lugar donde el escurrimiento por simple gravedad ha llegado a ser insignificante. Algo más allá de las escurridoras, la plancha de fibras es prensada entre dos rodillos húmedos: la llamada prensa húmeda; la plancha es nuevamente prensada entre dos pares de rodillos secos. Ya no queda entonces más que el secado, que se realiza haciendo pasar la hoja sobre unos cilindros calentados con vapor. El conjunto de estos cilindros calientes constituye el secadero. A la salida del secadero, la hoja queda dispuesta para su uso y se enrolla en una bobinadora.

En las máquinas modernas se llega a obtener una anchura de hoja de seis metros, y esta hoja se desplaza en la máquina a una velocidad de 400 metros por minuto.

Explosivos

Definición y teoría general. Pólvora negra. Dinamita. Algodón pólvora. Pólvoras B sin humo. Explosivos nitrados. Nitrato amónico. Explosivos cloratados y percloratados. Cheditas. Explosivos de cebo: fulminato de mercurio. Oxígeno líquido. Aplicaciones de los explosivos

Definición y teoría general. — Los explosivos son substancias capaces de producir, por una brusca reacción química, un gran volumen de gas a temperatura elevada. La expansión de los gases produce grandes efectos mecánicos.

La descomposición de un explosivo suele ser una combustión muy rápida. El combustible puede ser carbón, hidrógeno, azufre, acetileno, almidón, celulosa, etc.; el comburente es el oxígeno, excepcionalmente empleado en estado líquido y en general suministrado por combinaciones químicas muy oxigenadas: nitratos y derivados nitrados, cloratos y percloratos. Algunas substancias son explosivos completos, que comprenden a la vez el combustible y el oxígeno necesario para su combustión (nitrato amónico y derivados nitrados orgánicos). El nitrógeno y el cloro, por el contrario, entran en la composición de los explosivos únicamente como soportes inertes que intervienen por sus volúmenes gaseosos.

El aluminio, que emite gran cantidad de calorías con el oxígeno, se utiliza para elevar la temperatura de los gases de algunos explosivos (pólvora de aluminio y oxidante).

Los explosivos *deflagran* cuando la velocidad de desprendimiento de gases es moderada (velocidades de descomposición comprendidas entre algunos milímetros y varios centenares de metros por segundo). *Detonan* cuando la velocidad es de dos a siete kilómetros por segundo (onda explosiva).

Los explosivos de detonación o cebo se utilizan para provocar la explosión de cargas importantes de otros explosivos.

Según el sistema de cebo, un explosivo puede deflagrar o detonar.

El algodón pólvora deflagra si se le aplica una llama y detona por choque.

Los principales explosivos detonantes proceden de los ésteres nítricos de polialcoholes; los más conocidos son la nitroglicerina *(dinamita)* y la nitrocelulosa *(algodón pólvora)*; pero se utilizan también los ésteres nítricos del glicol, de la pentaeritrita, del manitol y del almidón.

Algunos provienen de la nitración de compuestos bencénicos: dinitro y trinitrobenceno, trinitrotolueno (T.N.T. o *tolita*) y trinitrofenol (ácido pícrico, *melinita*).

Otros se obtienen por nitración de compuestos diversos: ciclotrimetrilentrinitramina *(ciclonita)*, trinitrofenilmetilnitramina *(tetril)*.

Citemos, por último, los explosivos de cebo o fulminantes y los explosivos líquidos, cuyos componentes no se juntan sino en el momento de explotar: aire u oxígeno líquido con una materia orgánica, óxido nítrico líquido y anilina.

Los principales explosivos deflagrantes son la pólvora negra, las pólvoras a base de clorato y picrato y las pólvoras sin humo.

Se designa bajo el nombre de *explosivos binarios* los que resultan de la mezcla de dos explosivos. El primer ejemplo fue la mezcla del dinitrofenol con la melinita, para facilitar la carga de los proyectiles; después, a fin de obtener potentes efectos "de soplo" en las bombas, se han empleado las mezclas siguientes: el amatol, mezcla de nitrato amónico y T.N.T.; el tritanol, compuesto de aluminio en polvo y T.N.T.; el ciclotol, ciclonita y T.N.T.

Pólvora negra. — La pólvora negra está constituida por una mezcla de nitrato de potasa (salitre), azufre y carbón en proporciones variables. Su deflagración va acompañada de humos y de un residuo que ensucia las armas. Por eso casi no se emplea más que con fines bélicos, como carga de ignición para hacer arder la pólvora sin humo, que es la propulsora del proyectil.

Dinamita. — El explosivo a base de nitroglicerina, $C_3H_5O_3(NO_2)_3$, es un líquido aceitoso denso, muy sensible a los choques y al calor. Nobel tuvo la idea de envolverlo con cuerpos porosos (arena de infusorios, trípoli, harina, coque); le dio así estabilidad y obtuvo la mezcla conocida con el nombre de *dinamita*.

La nitrocelulosa puede gelatinarse por la nitroglicerina, y se obtiene así un explosivo de gran potencia denominado *gelatina explosiva*. Mezclándola con vaselina, resulta la *cordita*.

De gran potencia rompedora, la dinamita produce temperaturas del orden de 3 000° C y emite hasta 700 litros de gases por kilogramo.

Algodón pólvora. — El algodón pólvora es la base de las pólvoras y explosivos lentos empleados en la propulsión de proyectiles.

Se prepara el algodón pólvora por nitración de la celulosa obtenida del algodón y blanqueada cuidadosamente. El blanqueo comprende dos operaciones:

La *ebullición*, o lavado en autoclave a 115-120° C, durante cuatro horas, con una solución diluida de sosa, seguida de un lavado con agua;

La *cloración*, con una solución de hipoclorito o agua de cloro. Algunas veces se termina el blanqueo por una acidificación ligera o por tratamiento con bisulfito.

Los algodones pólvora tienen por fórmula:

(CP_1) $C_{24}H_{29}(NO_2)_{11}O_{20}$, insoluble.

(CP_2) $C_{24}H_{31}(NO_2)_9O_{20}$, soluble en alcohol éter.

La nitración se lleva a cabo según el siguiente tipo de reacción:

$$(C_6H_{10}O_5)_4 + 4m(NO_2 \cdot OH) \longrightarrow [C_6H_{10-m}(NO_2)_mO_5]_4 + 4mH_2O.$$

La operación se realiza en unos recipientes de 1,20 metros de diámetro, en donde se añade el algodón y la mezcla sulfonítrica. El ácido se elimina por desplazamiento con agua. El algodón pólvora se enjuaga con agua bicarbonatada y después con agua hirviendo; se escurre, se transforma en pasta y finalmente se seca.

Pólvoras B sin humo. — Si se disuelve el algodón pólvora (CP_2) con nueve grupos NO_2 en una mezcla de alcohol y éter, se obtiene un *colodión*, al cual se pueden añadir en seguida cantidades variables de CP_1. De ahí toda una serie de explosivos: las pólvoras rápidas de los fusiles de infantería contienen 75% de CP_1, y las pólvoras de cañones de marina, 50%.

Explosivos nitrados. — Se obtienen estos explosivos por acción del ácido nítrico en presencia de ácido sulfúrico sobre compuestos bencénicos o heterocíclicos. Entre los primeros, la melinita o ácido pícrico se prepara por nitración del fenol; el T.N.T., por nitración del tolueno. El fenol y el tolueno se obtenían en otro tiempo únicamente de los alquitranes de la hulla; la mayor parte procede ahora de los petróleos.

La ciclonita resulta de la nitración de la hexametilentetramina, producto de condensación del formol con amoniaco. Es uno de los explosivos más poderosos conocidos hasta la fecha.

Nitrato amónico. — En la composición del nitrato amónico entra el hidrógeno (combustible) y el oxígeno (comburente). Asociado con explosivos nitrados como la tolita, da los *explosivos de seguridad* Favier, empleados en las minas de carbón que contienen grisú; asociado con la dinitronaftalina, da la *schneiderita*, que se emplea en la carga de obuses.

Explosivos cloratados y percloratados. Cheditas. — Para la preparación de estos explosivos se añaden cloratos a una de las substancias siguientes: parafina, vaselina, grasas; la chedita suele ir acompañada de aceite de ricino e hidrocarburos nitrados (melinita, tolita, etcétera).

Estos explosivos son de doble efecto: con cebo, son rompedores; sin cebo, proceden como la pólvora negra; ocupan así un lugar intermedio entre ésta y la dinamita.

Explosivos de cebo: fulminato de mercurio. — El explosivo de cebo es un explosivo extremadamente violento y sensible al choque o a un calentamiento a 180° C. Se obtiene vertiendo en 250 partes de alcohol etílico nitrato de mercurio preparado con 25 partes de mercurio y 300 de ácido nítrico. Se calienta suavemente y se mantiene a una temperatura inferior a 60° C. El fulminato se deposita en agujas blancas. Añadiéndole 30% de agua, puede ser molido sin peligro en forma de pasta; a veces se agrega salitre o azufre. Una vez seco, se deposita entre dos chapas de latón y se obtienen así los pistones de percusión.

Hay otros explosivos de cebo, como la azida de plomo PbN_3, la triazida cianúrica C_3N_{12} y el trinitroresorcinato de plomo o estifnato de plomo. Estas substancias tienden a reemplazar el fulminato de plomo.

Oxígeno líquido. — El aire líquido y sobre todo el oxígeno líquido se utilizan a veces como explosivos en las minas y canteras.

Se transporta en botellas, del tipo "termo". Se humedece un cartucho de serrín, de hollín o de petróleo en oxígeno líquido, se introduce en el agujero que previamente se ha perforado y se provoca la explosión con una chispa eléctrica.

Aplicaciones de los explosivos. — Se utilizan los explosivos en las minas (explosivos rompedores, que no deben dar gases tóxicos ni temperatura elevada capaz de inflamar el grisú, con fines militares (explosivos rompedores o demoledores, pólvoras propulsoras para las armas), en pirotecnia (fuegos artificiales) y, por último, en la agricultura (cava, apertura de zanjas, arrancamiento de cepas, plantación de árboles, etc.).

Alcoholes

Generalidades. Principales alcoholes industriales. Alcohol metílico. Alcohol etílico: Alcohol de fermentación. Alcohol de síntesis. Rectificación del alcohol. Aplicaciones del alcohol. Otros alcoholes

Generalidedes. Principales alcoholes industriales. — En la industria se utilizan muchos alcoholes, ya como disolventes, ya, sobre todo, como productos intermedios de síntesis. Los dos principales son el alcohol metílico y el alcohol etílico; vienen después los alcoholes con varias funciones (polialcoholes): glicerina, glicoles, pentaeritrita, utilizados en la fabricación de explosivos y resinas artificiales, y finalmente los alcoholes superiores: propílico, butílico, láurico, etc., empleados principalmente en la preparación de disolventes y plastificantes. A excepción del alcohol etílico, una parte del cual se obtiene por fermentación, y de la glicerina, todos estos alcoholes son productos de síntesis.

Alcohol metílico. — El alcohol metílico o metanol se obtenía en otro tiempo únicamente por destilación de la madera; de ahí su nombre de alcohol de madera. Aún se produce una pequeña cantidad de esta forma, pero las nueve décimas partes se obtienen por síntesis directa. Esta síntesis se lleva a cabo haciendo pasar una mezcla de óxido de carbono con dos veces su volumen de hidrógeno, a 350-400° y 500 atmósferas de presión, sobre un catalizador a base de cromo y cinc.



$$CO + 2H_2 \longrightarrow H \cdot CH_2OH.$$

No sólo se obtiene metanol, sino también pequeñas cantidades de alcohol propílico y alcoholes superiores.

El alcohol metílico se utiliza sobre todo en la preparación de formol (formaldehido) por deshidrogenación:



$$HCH_2OH \longrightarrow HCHO + H_2.$$

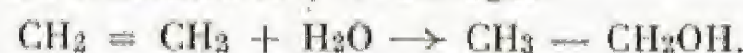
El formol entra en la fabricación de las materias plásticas artificiales más importantes (v. más adelante).

Alcohol etílico. — El alcohol etílico o etanol es el alcohol ordinario. Se obtiene por fermentación de jugos azucarados de origen diverso y por síntesis.

Alcohol de fermentación. — Para los alcoholes de fermentación se utilizan las melazas de la remolacha, de la caña de azúcar, de la uva, así como los jugos azucarados obtenidos en la transformación del almidón o de la celulosa en azúcares fermentables (sacarificación). Esta transformación puede realizarse ya por acción de la malta sobre el almidón, ya por acción de los ácidos sobre el almidón o sobre la celulosa.

La fabricación del alcohol a partir de las melazas o por sacarificación del almidón (alcohol de granos) es muy antigua y relativamente fácil. Puesto que la materia prima es algo cara, el alcohol así obtenido resulta a un precio relativamente elevado. Se han buscado materias primas más baratas, como la celulosa en forma de serrín de madera o residuos vegetales de toda clase. La sacarificación de la celulosa se efectúa por acción del agua en presencia de ácido y requiere la intervención del calor y, a veces, de la presión. Es difícil obtener buenos rendimientos con aparatos relativamente sencillos; por eso el alcohol de la celulosa sólo se ha producido en pequeñas cantidades. En la fabricación del papel por el procedimiento al bisulfito se produce una hidrólisis de la celulosa; de ahí que las aguas residuales de esta industria contengan azúcares fermentables y puedan, después de un tratamiento adecuado, ser sometidas a fermentación para obtener alcohol. Dado el bajo precio de la materia prima, cabe disponer en un futuro próximo de una interesante posibilidad de obtener este alcohol a un precio más asequible.

Alcohol de síntesis — Puede obtenerse alcohol etílico de síntesis combinando el óxido de carbono e hidrógeno como se hace para el alcohol metílico. Sin embargo, este procedimiento da una mezcla de alcoholes que apenas se utiliza más que como carburante (Synthol). La única síntesis empleada en gran escala consiste en fijar sobre el enlace etilénico los elementos H y O del agua:



$$CH_2 = CH_2 + H_2O \longrightarrow CH_3 - CH_2OH.$$

El etileno procedente de los hornos de coque o de los gases de cracking de las refinerías de petróleo es absorbido en ácido sulfúrico concentrado (97,5%); se forma sulfato ácido de etilo, que es descompuesto por el agua en alcohol y ácido sulfúrico diluido; éste se concentra para repetir el ciclo de fabricación. Esta síntesis del alcohol a partir del etileno es actualmente el procedimiento más económico. Se utiliza sobre todo en los Estados Unidos.

Rectificación del alcohol. — El alcohol etílico, cualquiera que sea el método de obtención, contiene agua en gran cantidad, hasta un 95%. Se procede entonces a una destilación fraccionada para separar el agua del alcohol. Desgraciadamente, estas dos substancias dan una mezcla con un 96% de alcohol, que destila a temperatura constante. Así, pues, no se puede, por simple destilación, obtener un alcohol de más de 96%. Para obtener alcohol anhidro o absoluto, se añade a la mezcla alcohol-agua una tercera substancia (benceno, gasolina o éter), elegida de tal modo que forme con el agua y el alcohol una mezcla ternaria que destile a temperatura constante e inferior a la de ebullición del alcohol. Así, pues, durante la rectificación, esta mezcla ternaria destila y queda como residuo el alcohol absoluto.

Aplicaciones del alcohol. — Además de su aplicación como disolvente y como intermediario en la fabricación de otros disolventes, el alcohol se emplea en la fabricación de caucho sintético (v. p. 364), que absorbe grandes cantidades de ese producto.

Otros alcoholes. — La hidrogenación de los ácidos grasos a presión elevada con un catalizador de cromita de cobre suministra alcoholes. Este procedimiento es empleado especialmente en la fabricación de alcohol láurico ($C_{12}H_{14}O$), a partir del ácido láurico proceoente del aceite de nuez de coco. El alcohol láurico, así como otros alcoholes semejantes, se emplea en la preparación de detergentes y espumantes sintéticos.

Plásticos y resinas artificiales

Definición y clasificación. Moldeo. Reseña histórica. — **Resinas termoendurecibles:** Resinas fenólicas. Resinas ureaformol. Galalita. Resinas de alkid. — **Resinas termoplásticas:** Celuloide. Acetato de celulosa. Éteres celulósicos. Resinas vinílicas. Poliestireno. Resinas acrílicas. Politeno. Siliconas

Definición y clasificación. — Se designan bajo el nombre de *plásticos* los productos que pueden dar por moldeo objetos que posean propiedades de dureza y flexibilidad análogas a las de algunas substancias naturales, tales como el asta, la concha, el marfil, etc. Desde el punto de vista químico, los plásticos son polímeros de grado alto, o sea compuestos de masa molecular muy grande. Los textiles artificiales y los cauchos sintéticos son igualmente polímeros "altos". Es difícil diferenciar estas tres clases de productos; sólo pueden distinguirse por el uso a que se destinan.

Los plásticos y las resinas sintéticas pueden agruparse en dos grandes clases: productos termoendurecibles y productos termoplásticos. Los primeros experimentan, por la acción del calor y la presión en el momento del moldeo, una transformación química que los hace infusibles e insolubles en los disolventes ordinarios. Los segundos, por la acción del calor, pasan a un estado pastoso o líquido que permite su moldeo.

Las materias plásticas termoendurecibles no pueden, pues, ser moldeadas por segunda vez; por el contrario, las termoplásticas pueden, en principio, ser moldeadas indefinidamente.

Algunas veces se hace distinción entre plásticos y resinas artificiales, considerando como resinas artificiales o sintéticas las substancias de gran peso molecular obtenidas a partir de compuestos relativamente sencillos, desde el punto de vista químico, por condensación y polimerización; y no se consideran tales los productos de elevado peso molecular obtenidos ya a partir de resinas naturales, proteínas y celulosa, por tratamientos químicos, ya de resinas naturales sin modificación química. Según esto, la denominación de plásticos abarca un campo mayor, puesto que comprendería las resinas artificiales y las que no lo son. Sin embargo, en algunos casos (poliestireno), ambas denominaciones son intercambiables.

Moldeo. — Antes del moldeo se mezclan las resinas artificiales con rellenos o cargas (celulosa, polvo de madera, fibra de algodón, asbesto, etc.), colorantes y pigmentos, plastificantes (alcanfor, ftalatos, ésteres de glicol, etc.), catalizadores y lubricantes. Todas estas substancias tienen como objeto mejorar las propiedades de moldeo de los plásticos, darles flexibilidad y aumentar su resistencia mecánica y química.

Para moldear los plásticos termoendurecibles, se colocan la resina y las cargas en moldes que se calientan a temperaturas del orden de 120 a 200° C y se someten a presiones que pueden llegar hasta 200 kilogramos por centímetro cuadrado. Se mantiene el calor y la presión el tiempo suficiente para que se realice la transformación química del plástico. Este tiempo varía desde algunas decenas de segundos a varios minutos.

Los materiales termoplásticos, por el contrario, se calientan previamente hasta obtener un estado pastoso, y seguidamente se inyectan a presión en moldes fríos, donde por enfriamiento adquieren el estado sólido.

Reseña histórica. — Las primeras materias plásticas utilizadas por el hombre fueron mezclas de cera o resinas naturales con distintos materiales.

La primera verdadera substancia plástica utilizada industrialmente fue el celuloide (1870); después vinieron la baquelita (1909), el acetato de celulosa (1912), la galalita (1918), el acetato de vinilo (1919), los derivados de la urea-formaldehído (1924), los ésteres acrílicos (1931),

la bencilcelulosa (1933), los cloruros de vinilo (1935), los metilmetacrilatos (1936), los poliestirenos (1937), el politeno (1940), los cloruros de vinilideno (1941) y las siliconas. En 1952, la producción mundial de materias plásticas alcanzó ya el millón de toneladas.

Resinas termoendurecibles

Resinas fenólicas. — Algunas veces se engloban estas resinas bajo el nombre de baquelitas, derivado del de la primera de la serie descubierta por Backeland. Se obtienen por condensación de los fenoles con aldehídos. Los fenoles utilizados son el propio fenol y los cresoles; como aldehídos, se emplean el formol y el furfural. Las materias primas para su fabricación se extraen principalmente del alquitrán de hulla.

Las resinas fenólicas poseen muy buenas propiedades mecánicas, gran resistencia al calor y a los agentes químicos y son poco conductoras del calor y la electricidad. Se utilizan mucho en la fabricación de aislantes eléctricos, teléfonos, ceniceros, aparatos de radio y engranajes silenciosos. Representan casi un tercio de la producción total mundial de plásticos.

Resinas urea-formol. — Estas resinas, obtenidas por condensación de la urea con el formol, son materias incoloras que pueden ser empleadas en la construcción de objetos transparentes o de colores claros. Menos resistentes mecánicamente que las resinas fenólicas, se utilizan mucho en decoración y en la fabricación de juguetes.

Se obtienen resinas análogas reemplazando la urea por la melamina; estas resinas poseen mucha dureza y mucha resistencia a la abrasión.

Galalita. — La galalita es una materia plástica que se obtiene a partir de la caseína de la leche. Después del moldeo, se somete la materia a la acción del formol, que produce el endurecimiento final. La galalita apenas se emplea más que para la fabricación de botones y boquillas.

Resinas de alkyd. — Estas resinas se producen por reacción de un poliácido (ácido ftálico, maleico) y un polialcohol (glicerina, glicol). Su deficiente moldeabilidad hace que apenas se utilicen como plásticos moldeados. Se emplean especialmente en la preparación de pinturas y barnices, por su resistencia a los agentes atmosféricos, facilidad de aplicación, brillo, adhesividad y rapidez de secado.

Resinas termoplásticas

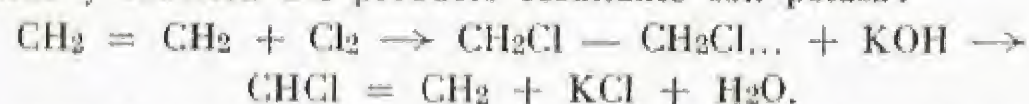
Celuloide. — El celuloide es una mezcla de nitrocelulosa (65 %) y alcanfor (35 %). Es muy barato y se trabaja con mucha facilidad; posee poca resistencia mecánica y su principal inconveniente es su gran inflamabilidad. Se utiliza sobre todo para plumas estilográficas, mangos de cuchillos y juguetes.

Acetato de celulosa. — El acetato de celulosa se obtiene por esterificación de las funciones alcohol de la celulosa con ácido acético. Tiene propiedades análogas a las del celuloide, pero no es inflamable. A pesar de todo es poco empleado, a causa de su elevado precio. Se utiliza para los volantes de automóvil, las gafas de protección, etc. Se puede reemplazar el ácido acético por otros ácidos orgánicos o mezclas de ácidos. Así, se emplean también los propionatos y butiratos de celulosa.

Éteres celulósicos. — Los éteres celulósicos son productos obtenidos al transformar las funciones alcohol de la celulosa en éteres-óxidos. Suelen ser metil, etil o benzilcelulosas. Los éteres celulósicos son más estables que el celuloide o el acetato de celulosa ante la acción de los álcalis y poseen una flexibilidad excelente aun a baja temperatura. Sirven para fabricar películas fotográficas, aislamiento de conductores, etcétera.

Resinas vinílicas. — Estas resinas han tomado gran desarrollo en los últimos años. El radical vinilo tiene por fórmula $CH_2 = CH —$.

Se utilizan el acetato de vinilo $CH_3CO\,O\,CH = CH_2$, o el cloruro $ClCH = CH_2$, o mezclas de ambos. Estos dos cuerpos tienen la propiedad de polimerizarse fácilmente y dar productos termoplásticos incoloros. El acetato de vinilo se obtiene por acción del ácido acético sobre el acetileno; el cloruro se prepara por acción del cloro sobre el etileno y reacción del producto resultante con potasa:



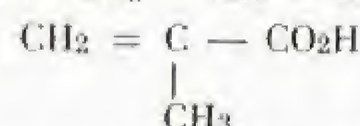
$$CH_2 = CH_2 + Cl_2 \rightarrow CH_2Cl — CH_2Cl ... + KOH \rightarrow$$
$$CHCl = CH_2 + KCl + H_2O.$$

Las propiedades de estas resinas varían según procedan del cloruro, el acetato o la mezcla de ambos; la procedente de ésta es preferible a las otras dos. Se utilizan para recubrimiento de superficies, en la fabricación de láminas y para el recubrimiento de alambres y fibras textiles.

Saponificando los poliacetatos de vinilo se obtienen polialcoholes vinílicos, que son resinas solubles en agua; éstas se emplean como colas y en aplicaciones especiales.

Poliestireno. — El poliestireno es el producto de la condensación normal del estireno o el vinilbenceno. Es un producto transparente como el cristal, de baja densidad y resistente a los álcalis y a los ácidos. Se utiliza en tapas de frascos de ácidos y álcalis, rótulos, peines y como aislante eléctrico.

Resinas acrílicas. — Se obtienen las resinas acrílicas por polimerización del ácido acrílico $CH_2 = CH — CO_2H$, del ácido metacrílico



$$CH_2 = \underset{\displaystyle CH_3}{\overset{|}{C}} — CO_2H$$

o de sus ésteres metílicos. Son productos duros, muy transparentes y utilizados por este motivo como vidrios orgánicos (plexiglás).

Politeno. — El politeno es el producto obtenido por condensación normal del etileno. Su fórmula es $(CH_2)_n$. Es de una resistencia muy grande a todos los agentes químicos y posee además propiedades dieléctricas inigualadas; es insustituible, en particular, en los aparatos de radar.

Un derivado del politeno es el politetrafluoroetileno (teflón), muy utilizado en la industria química por su gran resistencia a todos los agentes químicos, así como por lo elevado de su punto de ablandamiento (326° C).

Siliconas. — Las siliconas son productos orgánicos en los cuales ciertos átomos de carbono son reemplazados por átomos de silicio. Ciertas siliconas se utilizan como materias plásticas. Hay diversas clases de siliconas y su propiedad esencial es una gran resistencia al calor y, en general, a las variaciones de temperatura. Impregnando con silicona los tejidos, los espejos y el papel, se vuelven impermeables al agua.

Caucho natural y cauchos sintéticos

Reseña histórica. — **Caucho natural:** Recolección del látex. Sus propiedades. Fabricación del caucho. Caucho regenerado. Cauchos clorados. Aplicaciones del caucho. Ebonita. — **Cauchos sintéticos:** Caucho de cloropreno. Caucho al butadieno (Buna). Cauchos de polisulfuros (tiocoles). Cauchos butilos

Reseña histórica. — Algunos historiadores cuentan que Colón, en su segundo viaje, vio a los indios jugar con bolas elásticas obtenidas con jugos de árboles, y que Moctezuma, en 1520, entretuvo a Cortés y a sus soldados haciéndoles presenciar un partido jugado con estas pelotas.

El primer estudio científico del caucho lo realizaron **Fresnau** y **La Condamine,** y ambos trataron, sin éxito, de introducirlo en Europa.

La primera aplicación del caucho fue la goma de borrar. **Magallanes,** descendiente del célebre navegante, fue quien propuso su empleo. **Priestley,** en Inglaterra, extendió su uso, y el caucho recibió así el nombre de *india rubber* (borrador indio).

Macquer, partiendo de los trabajos de La Condamine, indicó el medio de fabricar tubos flexibles de caucho. Por otra parte, consiguió disolver el caucho en éter.

Mientras tanto, comenzó a extenderse por América la fiebre del caucho: los calzados impermeables de los indios eran muy apreciados. En Nueva Inglaterra y Rhode Island se fabricaron tejidos impermeables y calzados para la nieve. En 1832 se creó la fábrica de Rosburg. Desgraciadamente, los artículos de caucho natural no vulcanizado se alteraban por la acción del frío, que los hacía quebradizos, y por la del calor, que los volvía pegajosos y los desintegraba.

Goodyear, después de muchos trabajos y fracasos, descubrió, por una casualidad, la vulcanización del caucho.

En 1815, **Hancok,** obrero cerrajero inglés, inventó un colchón de caucho y, asociado a **Mac Intosh,** fabricó el famoso vestido impermeable Mac Intosh. Después realizó a escala industrial el desmenuzado, laminado y prensado en masa del caucho. Mac Intosh descubrió el empleo de la bencina como disolvente; Hancok preconizó el uso de la almáciga y la calefacción del caucho, y consiguió fabricar pelotas elásticas.

Finalmente, Hancok descubrió el secreto del caucho vulcanizado de Goodyear, consiguió moldear el caucho e ideó las cubiertas de caucho.

En 1850 se fabricaron ya juguetes de goma y pelotas de caucho macizo (golf, tennis) y hueco (balón rojo).

En 1845, **R. W. Thomson** había inventado el neumático, la cámara de aire y la cubierta de rodadura de los vehículos.

La invención del velocípedo en 1869, por **Michaux,** condujo a la de las cubiertas de caucho macizo, después a las de caucho hueco, y finalmente se inventó de nuevo el neumático, pues el descubrimiento de Thomson había caído en el olvido.

Bouchardat, por último, realizó la síntesis del caucho por polimerización del isopreno (1879-1882).

El primer neumático de bicicleta data de 1890. En 1895, **Michelin** tuvo la atrevida idea de adaptar el neumático al automóvil. Desde entonces, el caucho ha adquirido una importancia preponderante en el mercado mundial, hasta el punto de que, en 1952, los Estados Unidos consumieron 450 000 toneladas de caucho natural y 810 000 de caucho sintético (48 % de la producción mundial).

Caucho natural

Recolección del látex. Sus propiedades. — Hay muchas plantas naturales que pueden suministrar caucho; las dos principales son la *hevea brasiliensis* y el *ficus elástica*. La hevea es la más empleada.

La *hevea brasiliensis*, originaria del Amazonas, fue introducida en las plantaciones del Extremo Oriente. Necesita de seis a ocho años para comenzar a producir, y doce para dar su pleno rendimiento.

La recolección del látex se hace diariamente o cada dos días, practicando unas incisiones en la corteza en forma de banda estrecha; estas incisiones se hacen oblicuamente, abarcando casi la cuarta parte de la circunferencia, que es de 13 a 15 centímetros.

El látex que escurre se recoge en una taza de vidrio o porcelana colocada al final del corte. Es un líquido blanquecino que contiene glóbulos emulsionados de forma ovalada o redondeada. Una hevea produce de 1 500 gramos a 4 ó 5 kilogramos.

El látex recogido se pasa por un tamiz para eliminar hojas, cortezas y suciedad y se diluye con agua para separar las materias extrañas, como arena, barro, etc.

Para la coagulación, que transforma el látex en caucho, suele emplearse un ácido como coagulante; el mejor es el ácido fórmico, pero el más corriente es el ácido acético.

El caucho se coagula en masa, en forma de capas espesas, de las que se hacen planchas o goma elástica.

Para obtener las planchas se lleva la masa coagulada a un laminador que posee dos cilindros lisos, y después se hace pasar por unos cilindros estriados. La plancha se seca a unos 45° C, por contacto con humos de madera durante 15 días. Para preparar la goma elástica, se hace pasar el coágulo por unos laminadores, cuyos cilindros estriados giran a diferentes velocidades, que se rocían constantemente con agua. De esta forma se consigue reducir el caucho a una fina película de muchos metros de longitud, cuyo secado puede realizarse al aire libre.

Se ha observado que el suero separado del caucho lleva consigo algunos elementos cuya importancia práctica, desde el punto de vista de la vulcanización posterior y de la conservación de las mezclas, no era despreciable. Por todas estas razones, se han buscado medios para utilizar directamente el látex en la fabricación de objetos de caucho.

Para disminuir los gastos de transporte, el látex se concentra por evaporación o por centrifugación. Mientras la concentración de caucho en el látex natural es del 35 al 38 %, puede obtenerse látex concentrado de 73 %. Para evitar su coagulación espontánea es preciso estabilizar el látex; con este objeto se emplea el amoniaco, que sirve igualmente para impedir la putrefacción de las materias albuminoides contenidas en el látex.

Fabricación del caucho. — En todos los casos, salvo si se trata de goma elástica, el caucho debe ser vulcanizado para evitar que se vuelva pegajoso en caliente y quebradizo en frío, así como para darle buenas propiedades mecánicas.

La vulcanización se realiza por acción del azufre, generalmente en caliente, sobre el caucho. Desde el punto de vista teórico, este fenómeno no está explicado aún. En la práctica, el azufre se añade al caucho en una proporción que oscila de 0,15 a 15 %, según los artículos, y se somete la mezcla a la acción de una temperatura que varía entre 130 y 140° C, generalmente a presión. Para activar la acción del azufre sobre el caucho, se emplean catalizadores denominados *aceleradores de vulcanización;* éstos son compuestos sulfurados orgánicos complejos, de los cuales algunos contienen en su molécula cinc.

Con los aceleradores, el proceso de vulcanización dura sólo algunos minutos; ciertas substancias, las ultraaceleradoras, ejercen tal acción que la vulcanización se produce a la temperatura ambiente; no se emplean más que para objetos fabricados a partir del látex.

Es muy raro que el caucho se emplee en estado puro; suelen incorporársele cargas, ya para mejorar sus propiedades físicas, ya para darle color, ya simplemente para rebajar su precio. Las cargas más frecuentemente empleadas son:

El *óxido de cinc*, que exalta la acción de los aceleradores y da al caucho mejores propiedades mecánicas;

El "*negro de carbón*", especie de negro de humo obtenido por combustión incompleta de gases naturales. Su empleo ha permitido cuadruplicar la duración de los neumáticos;

Los *colorantes*, que son pigmentos minerales: blanco de cinc, ultramar, ocres, minio, bermellón, etc.;

Las *cargas* propiamente tales, cuya finalidad es exclusivamente disminuir el precio; pueden ser orgánicas (cauchos regenerados) y minerales (carbonato de cal, tierras arcillosas, sulfato de bario).

Finalmente, se añaden al caucho, en pequeñas cantidades, ceras, ácidos grasos, alquitrán de madera y antioxidantes, ya sea para mejorar su aspecto, ya para disminuir la acción destructora del ozono sobre el caucho.

Cuando se parte de la goma bruta procedente de la coagulación del látex, se comienza por picarla en una especie de laminadores provistos de unos cilindros de superficie estriada. Durante esta operación, la goma es lavada para arrebatarle las diversas impurezas que pudiera contener. Seguidamente se aprovecha la propiedad que tiene el caucho de unirse, en caliente, para transformar la goma picada en "plancha". Con este objeto, la goma se trata en un mezclador, especie de laminador con dos cilindros, uno estriado y otro liso. Estos cilindros se calientan con vapor y uno gira más aprisa que el otro. En este momento se añaden el azufre, los aceleradores y las distintas cargas. El todo se hace pasar muchas veces por el mezclador, a fin de conseguir una mezcla perfectamente homogénea. Ésta se transforma en plancha pasándola por una calandria donde es laminada entre dos cilindros lisos calentados con vapor y de separación variable.

Con esta plancha, después de cortada y encolada, se fabrican los distintos artículos de caucho. Muchos objetos llevan una capa de tejido, como las cubiertas de automóvil, las correas y las mangueras. Para que el caucho se adhiera a la tela, se impregna ésta con disolución o con látex. El objeto terminado se vulcaniza en seguida calentándolo a presión en un molde.

Antiguamente, en la fabricación de objetos finos, la impermeabilización de tejidos y la confección de hilos y pegamentos, sólo se empleaba la disolución de caucho en benzol, o, mejor, en disolventes clorados. Actualmente, se emplea cada vez más el látex para estos distintos usos.

Cuando se utiliza el látex, el azufre y las cargas se añaden en forma coloidal. Para fabricar un objeto cualquiera, se introduce el molde en la mezcla; el molde se cubre de una película de látex que se coagula, se seca y se vulcaniza. La vulcanización, gracias a las sustancias ultraacelerantes, puede efectuarse las más de las veces en frío.

Los hilos elásticos, especialmente los que entran en la confección de tejidos elásticos (tejidos de látex), se obtienen haciendo pasar el látex por una hilera y coagulándolo en un baño de ácido acético. Impregnando papel, fibras o tejidos con látex se obtienen cueros artificiales. Las esponjas se logran insuflando aire en el látex y coagulando seguidamente la espuma formada.

Los productos obtenidos a partir del látex son más elásticos y más sólidos que los fabricados con goma; además, el trabajo de ésta requiere un consumo considerable de energía mecánica. Por esto se ha intentado emplear únicamente látex para toda clase de usos, lo que no será posible sino cuando se consiga plenamente su estabilización, pues tiene todavía tendencia a coagularse espontáneamente.

Caucho regenerado. — El caucho regenerado se obtiene a partir de desechos de caucho, por ejemplo neumáticos, los cuales, una vez desmenuzados, son objeto de un tratamiento con sosa en autoclave. El caucho regenerado se utiliza, mezclado con caucho natural, en la preparación de objetos que no requieran muy buenas características mecánicas (suelas de goma, por ejemplo), ya que su resistencia a la tracción es la cuarta parte, aproximadamente, de la del caucho natural.

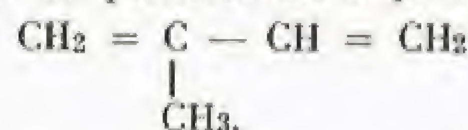
Cauchos clorados. — Combinando el cloro y el caucho, se obtienen los cauchos clorados, productos ininflamables y muy resistentes a los agentes químicos. Se utilizan en pintura y en la protección de metales. El ácido clorhídrico suministra, junto con el caucho, una materia transparente y flexible empleada para películas fotográficas (plio-films) y en algunos embalajes.

Aplicaciones del caucho. — Las aplicaciones del caucho son innumerables: neumáticos de automóviles, de aviones, de motos y de bicicletas; fabricación de cubiertas macizas para objetos pesados; fabricación de la hoja inglesa o goma elástica (más de 2 000 objetos diferentes, petacas para tabaco, bolsos, tirantes, etc.); hilo elástico; pelotas de tenis; fabricación de tejidos y calzados de caucho y de cintas transportadoras; cauchos dentarios, ebonita, alfombras, suelos, esponjas, etc.

Ebonita. — La ebonita es un caucho que contiene del 30 al 35% de azufre. Se presenta en forma de materia negra, dura y elástica, pero quebradiza. Con ella se fabrican piezas para aislamientos eléctricos, discos de gramófono, etc.

Cauchos sintéticos

El caucho natural es un polímero del isopreno



$$CH_2 = C(CH_3) - CH = CH_2$$

Las tentativas hechas para polimerizar el isopreno han aumentado nuestros conocimientos sobre la constitución del caucho, pero no han dado lugar a la producción industrial de caucho de síntesis.

En cambio, ciertos cuerpos, de fórmula vecina a la del isopreno, son utilizados para la fabricación de cauchos sintéticos comerciales. Tales son el cloropreno



$$CH_2 = CCl - CH = CH_2$$

y el butadieno



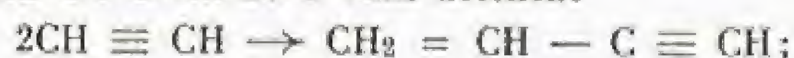
$$CH_2 = CH - CH = CH_2.$$

También se emplean otros compuestos muy diferentes del isopreno para la fabricación de substancias parecidas físicamente al caucho natural; por ejemplo, los disulfuros, el isobuteno y el cloruro de vinilo. Finalmente, se obtienen cauchos sintéticos de propiedades especiales polimerizando mezclas de los cuerpos anteriores, ya entre sí, ya con otros cuerpos.

Se ve, pues, que, en realidad, los cauchos llamados sintéticos son muy diferentes desde el punto de vista puramente químico del producto natural; se ha propuesto por ello darles el nombre de elastómeros.

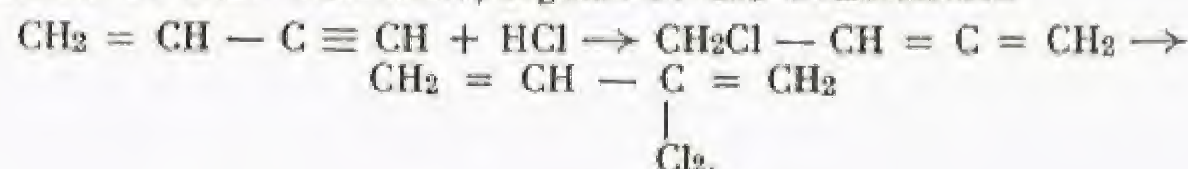
Caucho de cloropreno. — El cloropreno se obtiene a partir del acetileno mediante las siguientes reacciones:

Dimerización del acetileno a vinil acetileno



$$2CH \equiv CH \rightarrow CH_2 = CH - C \equiv CH;$$

adición de ácido clorhídrico, seguida de una isomerización

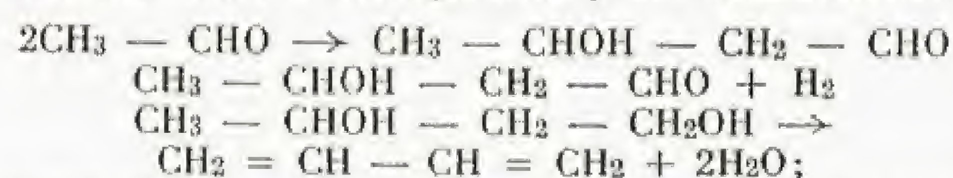


$$CH_2 = CH - C \equiv CH + HCl \rightarrow CH_2Cl - CH = C = CH_2 \rightarrow CH_2 = CH - C(Cl_2) = CH_2.$$

El cloropreno se polimeriza 700 veces más rápidamente que el isopreno. El producto obtenido no se vulcaniza con el azufre, sino con óxidos metálicos de magnesio o de cinc. Polimerizando el cloropreno en forma de emulsión acuosa se obtiene látex sintético. El caucho del cloropreno es comparable al caucho natural por sus propiedades mecánicas, y es más resistente que éste a los agentes químicos y a la acción de los disolventes orgánicos.

Caucho al butadieno (Buna). — El butadieno puede obtenerse de tres maneras:

1º A partir del acetileno, por hidratación en aldehído acético seguida de una condensación, una hidrogenación y una deshidratación:



$$2CH_3 - CHO \rightarrow CH_3 - CHOH - CH_2 - CHO$$
$$CH_3 - CHOH - CH_2 - CHO + H_2$$
$$CH_3 - CHOH - CH_2 - CH_2OH \rightarrow$$
$$CH_2 = CH - CH = CH_2 + 2H_2O;$$

2º A partir del alcohol, por oxidación catalítica en aldehído acético y reacción en caliente del aldehído tras la adición de más alcohol:

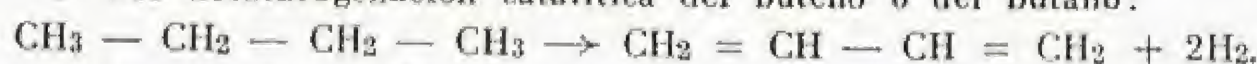


$$CH_3 - CH_2OH + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CH_3 - CHO + H_2O$$



$$CH_3 - CHO + CH_3 - CH_2OH \rightarrow CH_2 = CH - CH = CH_2 + 2H_2O;$$

3º Por deshidrogenación catalítica del buteno o del butano:



$$CH_3 - CH_2 - CH_2 - CH_3 \rightarrow CH_2 = CH - CH = CH_2 + 2H_2.$$

El butadieno se polimeriza por acción del sodio (símbolo Na), de donde proviene el nombre de "Buna" dado al caucho obtenido a partir del butadieno.

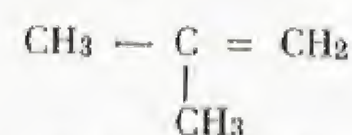
El Buna S es un copolímero del butadieno con estireno (vinilbenceno). La polimerización suele hacerse emulsionando ambas substancias en un líquido, que ordinariamente es agua y jabón. Se obtiene así un producto parecido al látex, que al coagularse suministra el caucho sintético. Se ha mejorado considerablemente la calidad del Buna efectuando la polimerización a muy baja temperatura (caucho frío).

El perbunan o Buna N se obtiene polimerizando una mezcla de butadieno y acrilonitrilo.

Los cauchos del tipo Buna S son los que más se asemejan al producto natural; se utilizan especialmente en la fabricación de neumáticos.

Cauchos de polisulfuros (tiocoles). — Se obtienen estos cauchos por acción de sulfuros alcalinos sobre diversos dicloruros orgánicos. No tienen la resistencia mecánica del producto natural, pero resisten muy bien a los agentes químicos, especialmente a los derivados del petróleo, por lo cual se emplean en el revestimiento de depósitos de hormigón para almacenamiento de gasolina y petróleo.

Cauchos butilos. — Estos cauchos se obtienen por polimerización del isobuteno



$$CH_3 - \underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{C}} = CH_2$$

y son los más resistentes a todos los agentes químicos. Actualmente se trabaja en la fabricación de cauchos butilos clorados, que ofrecen una excelente resistencia al calor.

La producción de caucho sintético en los Estados Unidos llegó a igualar, durante la segunda guerra mundial, a la del caucho natural. Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que todos estos productos tienen un costo de fabricación ligeramente superior al del caucho natural.

Fibras artificiales

Generalidades. Fibras de nitrato de celulosa. Seda Chardonnet. Rayón cuproamónico. Rayón viscosa. Acetato de celulosa. Lana sintética. Superpoliamidas. Nylon. Otras fibras artificiales

Generalidades. — Las fibras artificiales, salvo las del vidrio, son obtenidas a base de productos orgánicos. Casi todas las investigaciones realizadas en este campo tenían por objeto encontrar un producto artificial semejante a la seda natural y menos costoso. Las primeras fibras "semisintéticas" se obtuvieron de la celulosa, hacia el año 1891; en un principio fueron el nitrato de celulosa, la seda al cobre y la viscosa; posteriormente apareció el acetato de celulosa. Hasta hace pocos años se aplicaba el nombre de "rayón" a todas estas fibras; hubo que aclarar esa confusión y se aplicó el nombre de rayón a la seda al cobre (rayón cuproamónico) y a la viscosa (rayón viscosa), para distinguirlos del acetato de celulosa, que es un derivado de la celulosa, mientras que los dos primeros productos se pueden considerar como celulosa regenerada. Las tentativas realizadas para obtener fibras de constitución química semejante a la seda desembocaron en la fabricación de lana artificial a base de caseína (la lana y la seda difieren poco químicamente), y después en la de las fibras totalmente sintéticas, la primera de las cuales fue el Nylon, a base de superpoliamidas, cuyas propiedades mecánicas son muy superiores a las del producto natural que se trataba de imitar. Después han aparecido bastantes fibras totalmente sintéticas como el Vinyon (1939), el Saran (1940-1947), el Orlon (1948-1950), el Dynel (1950), el Acrilan (1950-1952) y el Dacron (1950), la mayoría de ellas derivadas de compuestos poliacrílicos.

Fibras de nitrato de celulosa. Seda Chardonnet. — El descubrimiento de la nitrocelulosa fue seguido muy pronto por tentativas para fabricar con ella fibras artificiales. El procedimiento fue explotado industrialmente por el conde de Chardonnet: consistía en disolver la nitrocelulosa en una mezcla de éter y alcohol, hacer pasar esta solución a través de un fino orificio y evaporar inmediatamente el disolvente. Los hilos así obtenidos eran muy inflamables; para eliminar este inconveniente, se trataban con hidrosulfito de sosa a fin de "desnitrarlos". Sin embargo, la seda Chardonnet está hoy totalmente abandonada; resultaba excesivamente costosa.

Rayón cuproamónico. — En este procedimiento, la celulosa se disuelve en el licor de Schweitzer (solución amoniacal de hidróxido de cobre) y esta solución se hila a través de un fino orificio, siendo regenerada la celulosa en un baño de ácido sulfúrico diluido. La seda al cobre no se produce actualmente más que en pequeñas cantidades.

Rayón viscosa. — Mientras que los dos procedimientos anteriores requieren como materia prima una celulosa muy pura (desechos de algodón), y por lo tanto costosa, el de la viscosa emplea la celulosa procedente de la madera. Puesta esta celulosa en solución coloidal por acción de la sosa y del sulfuro de carbono, se produce un compuesto orgánico sulfurado de la celulosa (xantato), cuya sal sódica es soluble en agua. La celulosa puede ser regenerada en un baño ligeramente ácido. En la práctica, la solución coloidal del xantato de celulosa se deja madurar hasta que adquiere cierta viscosidad (de ahí el nombre de *viscosa* dado a este procedimiento y a esta solución). Seguidamente se hila en un baño de ácido sulfúrico diluido. En lugar de hilos se pueden obtener láminas transparentes, el Celofán. A causa de su bajo precio, la fibra artificial así obtenida ha tenido un desarrollo considerable, que se mantiene todavía, gracias a las considerables mejoras introducidas en la elaboración de sus productos: rayón de fibra corta, rayón hilado, rayón de alta tenacidad.

Acetato de celulosa. — El éster acético de la celulosa o acetato de celulosa se utiliza al mismo tiempo como materia plástica y como fibra artificial. Para la fabricación de ésta, el acetato se disuelve en acetona y se hila, evaporando al aire la acetona. La seda al acetato posee mejores cualidades que el rayón viscosa, pero es más cara.

Lana sintética. — Se obtienen hilos de lana sintética coagulando una disolución alcalina de caseína en un baño ácido (v. GALATITA, p. 364). El hilo obtenido se endurece por un tratamiento con formol. Estos hilos tienen una resistencia a la tracción que llega al 80 % de la que posee la lana natural. Se utilizan especialmente en la confección de fieltros.

Superpoliamidas. Nylon. — El Nylon se obtiene por polimerización del ácido adípico



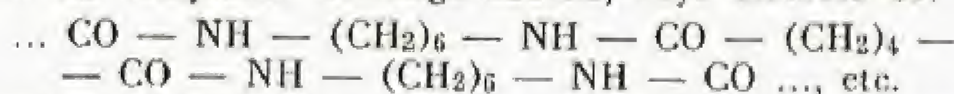
$$HO_2C - (CH_2)_4 - CO_2H$$

con la hexametilén diamina



$$H_2N - (CH_2)_6 - NH_2.$$

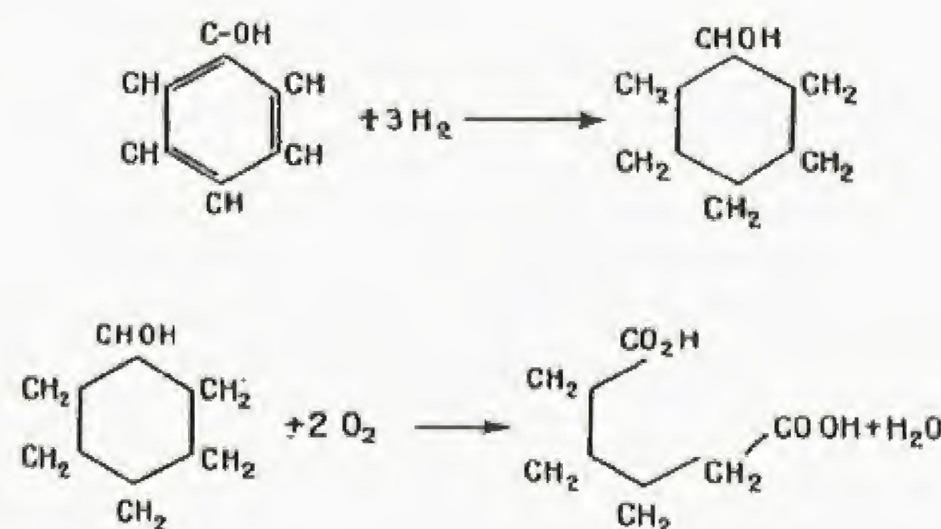
Se forma una sal que, por deshidratación, pasa a una amina y después a un compuesto de larga cadena, cuya fórmula es:



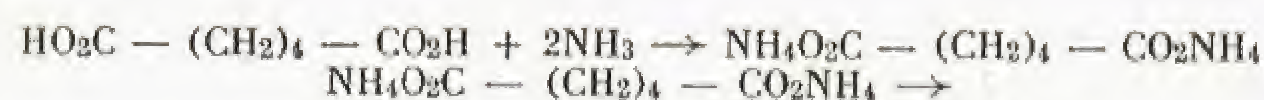
$$\ldots CO - NH - (CH_2)_6 - NH - CO - (CH_2)_4 -$$
$$- CO - NH - (CH_2)_6 - NH - CO \ldots, \text{ etc.}$$

La reacción se efectúa de modo que el polímero obtenido sea fusible (por encima de 200° C). Para obtener el hilo, se hace pasar el producto fundido por una máquina hiladora: por enfriamiento, los hilos se endurecen. Para que adquieran gran resistencia, estos hilos deben ser enfriados estando tensos.

El ácido adípico se obtiene por la serie de reacciones siguientes: hidrogenación del fenol en ciclohexanol, seguida de una oxidación con rotura del anillo bencénico



La hexametilén diamina proviene de la reacción del amoniaco sobre el ácido adípico, deshidratación en dinitrilo adípico e hidrogenación de éste:



$$HO_2C - (CH_2)_4 - CO_2H + 2NH_3 \rightarrow NH_4O_2C - (CH_2)_4 - CO_2NH_4$$

$$NH_4O_2C - (CH_2)_4 - CO_2NH_4 \rightarrow$$



$$\rightarrow N \equiv C - (CH_2)_4 - C \equiv N + 4H_2O$$



$$N \equiv C - (CH_2)_4 - C \equiv N + 2H_2 \rightarrow NH_2 - (CH_2)_6 - NH_2.$$

Se ha desarrollado recientemente la fabricación de ácido adípico a partir del furfurol, aldehído procedente de la calefacción de residuos vegetales con ácido clorhídrico.

Las propiedades mecánicas del Nylon son muy superiores a las de la seda. Un hilo de Nylon tiene la misma resistencia a la tracción que un hilo de acero de igual sección y pesa siete veces menos. La resistencia del Nylon al desgaste es también considerable. Se aplica, además de para las prendas de vestido, en la confección de telas para paracaídas y cuerdas muy resistentes (remolques de planeadores, cuerdas de alpinismo).

Existen otras superpoliamidas obtenidas a partir de productos distintos del ácido adípico. Sus propiedades son similares a las del Nylon. Entre ellas se puede citar el Perlon, fabricado en Alemania.

Otras fibras artificiales. — Se han lanzado ya al mercado fibras artificiales a base de cloruro y acetato de vinilo bajo el nombre de *Vinyon;* otras, como el *Saran*, son copolímeros de cloruro de vinilo y cloruro de vinilideno. Estas fibras son muy resistentes a los agentes químicos. Por último, se comienza a producir fibras formadas de poliésteres procedentes de la acción de un biácido (ácido tereftálico) con un polialcohol (glicerina o glicol), tales como el Dacron (U. S. A.) y el Terylene (Inglaterra), así como fibras acrílicas, entre las que se encuentran el Acrilan, el Dynel y el Orlon, cuya propiedad general más interesante es su resistencia a los agentes químicos y a toda clase de hongos y mohos.

Colorantes

Reseña histórica. Definición. — **Substancias colorantes vegetales:** Rubia, Índigo, Gualda, Campeche. Otros colorantes. — **Substancias colorantes animales:** Cochinilla. Otros productos. — **Substancias colorantes artificiales:** Color y constitución química. Tinte. (Directo. Sobre mordientes. En tina. Al hielo.) Principales colorantes artificiales. (Azocolorantes. Colorantes derivados del trifenilmetano, antraquinónicos, indigoides.)

Reseña histórica. — El arte del tinte estaba muy adelantado al final del siglo XVIII. Se empleaban, casi exclusivamente, substancias extraídas de los vegetales: rubia, índigo, pastel; se sabía que las fibras animales, lana y seda, tienen más afinidad con los colores que el algodón y el lino, para los cuales hacían falta mordientes.

Chevreul fue el primero que intentó aislar los principios colorantes de las plantas. Consiguió aislar la hematoxilina de la madera de campeche, la luteolina de la gualda, etc. Por sublimación del índigo obtuvo la indigotina, que estudiaron **Dumas** y **Laurent. Robiquet** y **Colin** extrajeron la alizarina y la purpurina de la rubia (1826-1827).

A principios del siglo XIX aparecieron las primeras materias colorantes artificiales y los primeros productos de síntesis orgánica. En 1832, **Reichenbach** y después **Runge** descubrieron el pitacal y el ácido rosólico.

En 1845, **Guinon,** de Lyon, utilizó el ácido pícrico para teñir la seda. Por la misma época, **Béchamp** y **Hoffmann** pusieron a punto la fabricación de la anilina. En 1856, **Perkin** obtuvo, por oxidación, el primer colorante derivado del alquitrán de hulla: el violeta de anilina; después, en 1858, **Verguin** descubrió la fuchsina. Había nacido la industria de los colorantes sintéticos. **Girard** y **De Laire** descubrieron el azul de Lyon; **Guinon** y **Marnas,** la azulina; al poco tiempo se descubrió el violeta de metilanilina y el negro de anilina; hacia 1869, **Caro, Graebe** y **Liebermann** registraron una patente para fabricar alizarina a partir del antraceno.

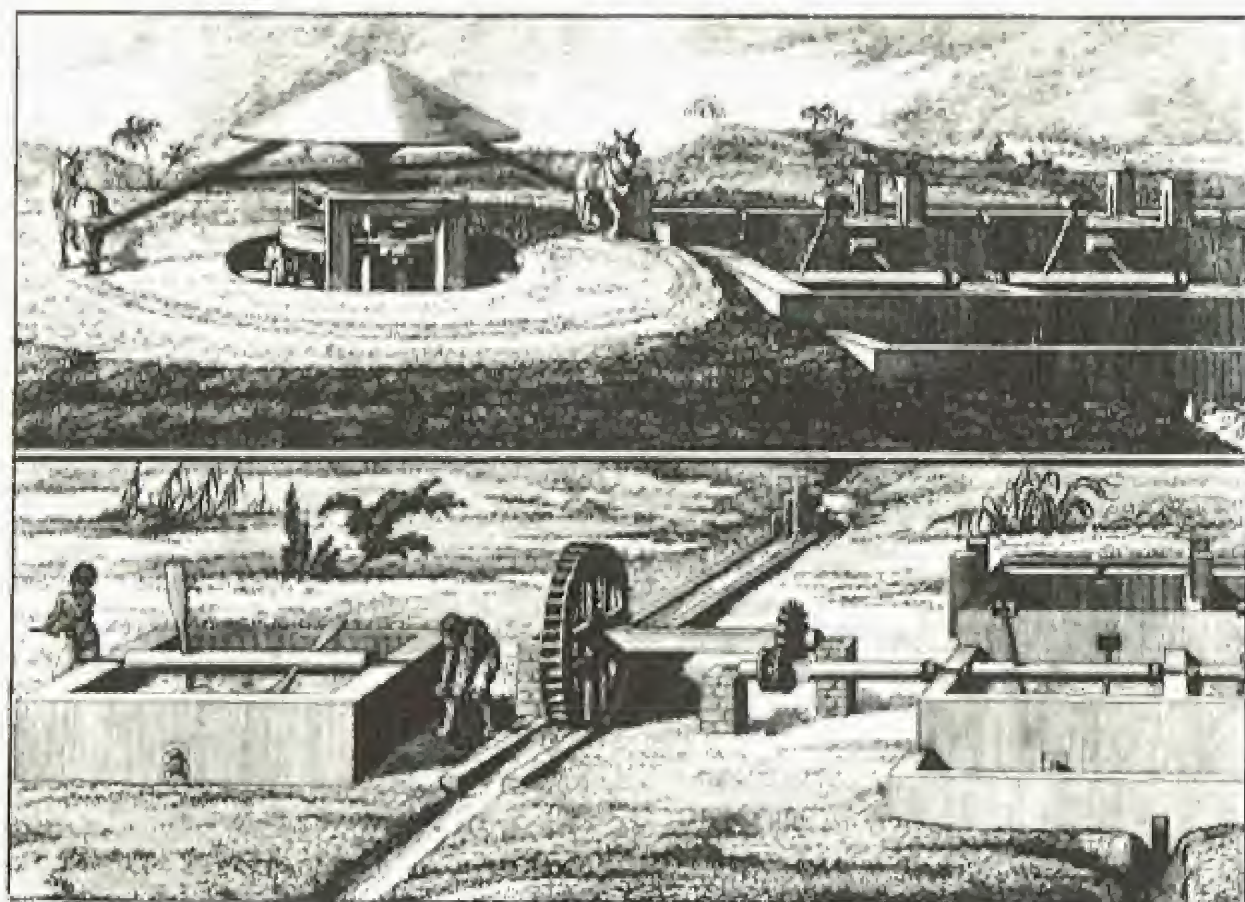
En 1880, **E.** y **O. Fischer** prepararon el verde de malaquita y **Baeyer** patentó la fabricación de índigo sintético.

Definición. — Una substancia se denomina "colorante" cuando es capaz de teñir una materia incolora, es decir, de comunicarle la propiedad de ser coloreada de manera que pueda durar mucho.

Como se ve, hay una distinción entre colores y colorantes.

Los colores son productos coloreados de origen vegetal, animal y especialmente mineral, y se emplean como pigmentos; los colorantes son productos que sirven para teñir fibras animales, vegetales y sintéticas.

Algunos colorantes no se fijan bien en las fibras y dan combinaciones poco estables. En estos casos se recurre a un intermediario, el *mordiente*, que, como posee igual afinidad con la fibra y con la substancia colorante, se fija sobre la primera y forma después un compuesto insoluble con la segunda; generalmente, el mordiente realza el brillo del color (sales de aluminio, de hierro, de estaño, de plomo, caseína, gluten, albúmina, tanino, aceites oxidados, etc.).



Molino de sangre para batir el índigo (Descripción de las artes y oficios por la Real Academia Francesa de Ciencias) [1760-1780]

Substancias colorantes vegetales

En tiempos pasados, las substancias colorantes vegetales más empleadas fueron la rubia, el índigo, la gualda y el campeche.

Rubia. — Originaria de Oriente, la rubia de los tintoreros *(Rubia Tinctorum)* se cultivaba en Holanda y en Francia. La raíz de esta planta se molía y, una vez seca, se utilizaba directamente o bien se enriquecía mediante unas maceraciones en agua o ácido sulfúrico diluido (flor de rubia). El cultivo de la rubia fue arruinado al obtenerse la alizarina sintéticamente.

Índigo. — El índigo, importado en Europa en el siglo XVI, se extraía de ciertas plantas del género *Indigofera.* Aunque el índigo natural ha sido reemplazado hoy día por el índigo sintético, todavía se extrae de la planta. Se ponen las hojas a macerar en una cuba llena de agua hasta las tres cuartas partes, durante veinte horas, y se comprimen por medio de unas planchas. Cuando la fermentación está avanzada, se trasiega el líquido verdoso, que se recoge sobre una lechada de cal. Se agita con unas varas: el color pasa del verde al azul y en el fondo de la cuba se deposita una capa espesa. Este depósito, una vez aislado, se hierve con agua pura; se recoge la pasta, se prensa y se obtienen panes de índigo. Este producto no es puro. Contiene 90 % de indigotina y otros productos: rojo, amarillo y pardo de índigo.

Gualda. — La gualda, denominada aún *reseda de los tintoreros* o *hierba de los judíos*, es una hierba bianual, de 1 a 1.50 metros de altura, que se cría, en especial, en los lugares arenosos de Europa. Cultivada antiguamente como planta tintórea, daba a los tejidos a que se había aplicado un mordiente de alumbre un bello tinte amarillo, sólido y brillante (luteolina).

Campeche. — Existen numerosas variedades de madera o palo de campeche *(Hoematoxylum Campechianum).*

Esta madera contiene en sus tejidos la hematoxilina, que por oxidación pasa a hemateína. Se fija sobre la fibra con un mordiente de alúmina (violeta), de sales de cobre (azul) o de hierro (negro). Para la extracción del colorante se corta la madera en trozos que se dejan durante algún tiempo en contacto con una lejía diluida de carbonato, después de lo cual se someten a una cuidadosa extracción en una serie de autoclaves. En el momento de la concentración, se adiciona nitrito y ácido sulfúrico.

Otros colorantes. — Entre los colorantes *rojos* se pueden citar: el cártamo, la orcaneta, la orchilla, la madera o palo de Brasil, el fustete y el sándalo; entre los colorantes *amarillos:* el azafrán, el quercitrón, la madera amarilla, la cachunda y la cúrcuma; entre los colorantes *azules:* el pastel, y entre los *negros:* la nuez de agallas (tintas) y la sepia (lavis).

Substancias colorantes animales

Cochinilla. — La cochinilla es un insecto *(Coccus cacti)* originario de México. Se cogen estos animales en el momento que las hembras van a efectuar la puesta y se echan en agua hirviendo. El carmín obtenido es magnífico; antes de desarrollarse la industria de los colorantes sintéticos era de los más apreciados. Aún se utiliza hoy en las barras de labios.

Otros productos. — Se pueden citar el *kermes*, procedente del *Coccus ilicis*, insecto de las encinas verdes del Languedoc, en Francia

(polvo rojo oscuro), y la *púrpura* del *múrex* (púrpura de los fenicios), molusco de los mares calientes o templados.

Substancias colorantes artificiales

Color y constitución química. — Todos los productos orgánicos coloreados no son colorantes.

Algunos grupos con dobles enlaces, como NO, el grupo azo, etc., comunican a los compuestos aromáticos la propiedad de ser coloreados: estos grupos se denominan *cromóforos*.

Los compuestos que los contienen, como el azobenceno, la antraquinona, etc., son llamados *cromógenos*.

Los cromógenos no son colorantes aptos para el tinte, son simplemente substancias coloreadas. En cambio hay otros grupos, como OH, NH_2, que de por sí no dan color a una molécula, pero que unidos a un cromógeno forman un colorante; estos grupos, denominados *auxócromos*, tienen carácter salino. Finalmente, hay grupos, como SO_3H o CO_2H, que no pueden transformar un cromógeno en colorante, pero que comunican a éste mayor solubilidad, mayor afinidad con las fibras o mayor resistencia.

Un hidrocarburo incoloro, gracias, por ejemplo, a la introducción en su molécula de un grupo cromóforo, forma un cromógeno coloreado que, por la introducción de un grupo auxócromo, da un colorante.

Tinte. — El tinte consiste en fijar el colorante sobre la fibra de un modo duradero. Se utilizan cuatro procedimientos, según la naturaleza de la fibra y el colorante.

1° **Tinte directo.** El tinte directo consiste en sumergir el tejido o el hilo en una solución acuosa caliente del colorante. Esto no es posible más que con los colorantes denominados *substantivos*. La lana y la seda son los tejidos que más fácilmente se tiñen por este procedimiento. Los colorantes substantivos suelen ser ácidos; el baño de tinte contiene, además del colorante, sulfato sódico y un ácido. Los colorantes substantivos para algodones son menos corrientes.

2° **Tinte sobre mordientes.** Cuando se utilizan colorantes no substantivos o adjetivos, hay que fijar sobre la fibra un producto, el *mordiente*, que adsorberá el colorante y lo fijará sobre la fibra. Los mordientes pueden ser substancias minerales (óxidos de aluminio, de hierro, de cromo, etc.) u orgánicas (tanino, aceite rancio, aceite sulfonado).

El tejido que se ha de teñir se sumerge en el baño de mordiente y, una vez éste fijado, en el baño de tinte.

3° **Tinte en tina.** Este tinte se emplea para los colorantes insolubles en agua, ácidos o bases. El colorante se transforma por reducción, generalmente con hidrosulfito sódico, en un producto incoloro (leucoderivado), que es soluble. Éste se fija sobre la fibra y después, por oxidación, se obtiene el colorante primitivo. El índigo o añil es un colorante de este tipo.

4° **Tinte al hielo.** El tinte al hielo consiste en formar el colorante en la misma fibra. Con este objeto, el tejido o el hilo se impregnan de un producto, y son después empapados en una solución de otro. Por reacción de uno sobre otro se forma un colorante.

Este procedimiento se utiliza únicamente para los azocolorantes, cuya preparación se hace a la temperatura del hielo (0° C); de ahí el nombre de *tinte al hielo*.

El estampado de los tejidos está basado en los mismos principios que el tinte. Uno de los métodos consiste en estampar sobre el tejido el dibujo deseado con pasta del colorante reducido, operación a la que sigue una oxidación posterior para desarrollar el color. En los colorantes para mordiente se estampa con una mezcla del colorante y el mordiente, y se desarrolla el color con vapor. Otro método consiste en teñir todo el tejido y estampar el fondo (no el dibujo) con una pasta del agente reductor; el color se reduce con vapor, y el leucoderivado se elimina por lavado con álcali.

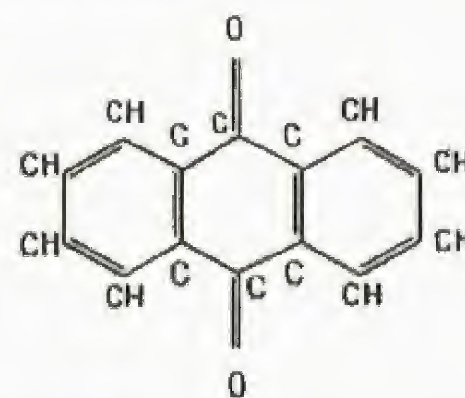
Principales colorantes artificiales. — Existe un número considerable de colorantes artificiales; hoy han reemplazado casi totalmente a los productos naturales, a los cuales suelen superar por sus propiedades y su variedad. Los colorantes utilizados en la práctica se pueden agrupar en las clases siguientes:

1° **Azocolorantes.** Los azocolorantes se obtienen por acción del ácido nitroso, a 0° C, sobre una amina aromática, con reacción posterior con un fenol, una amina aromática u otros compuestos aromáticos. Este género de colorantes puede variarse indefinidamente modificando la naturaleza de la amina o del fenol, empleando mezclas de aminas, etc.

Los azocolorantes constituyen el grupo más importante de los colorantes artificiales.

2° **Colorantes derivados del trifenilmetano.** El trifenilmetano tiene por fórmula $(C_6H_5)_3$ — CH; los colorantes de este grupo proceden de la substitución de los radicales fenilo C_6H_5 por radicales variados (NH_2, OH, etc.).

3° **Colorantes antraquinónicos.** Las fórmulas de estos colorantes derivan de la fórmula de la antraquinona:



El más conocido es la alizarina.

4° **Colorantes indigoides.** Las fórmulas de los colorantes indigoides son parecidas a las del índigo. Generalmente son colorantes de tina.

Perfumes

Reseña histórica. Perfumes de origen animal. Perfumes vegetales. Aceites esenciales. Extracción de los aceites esenciales. Tratamiento de la esencias. Perfumes sintéticos

Reseña histórica. — Hasta finales del siglo XIX, los perfumes de uso corriente eran de origen animal (almizcle, civeto, ámbar gris) o de origen vegetal.

En 1880, **Thieman** y **G. de Laire** estudiaron el constituyente odorífero del iris y de la violeta y aislaron la irona. Hacia 1888, consiguieron preparar una substancia parecida a la irona, la ionona. La aparición de este producto, obtenido sintéticamente, marcó una nueva era en la perfumería.

Poco más tarde aparecieron la vanillinia, la cumarina y la heliotropina; después, centenares de productos sintéticos nuevos fueron empleados en perfumería al lado de los perfumes naturales.

Perfumes de origen animal. — Hoy, estos perfumes son los menos empleados, a causa de su elevado precio.

El *civeto* es un líquido untuoso, transparente y homogéneo, segregado por las glándulas perineales de un pequeño mamífero de Abisinia y la India. El constituyente odorífero es la civetona.

El *almizcle* es un producto negruzco sólido, que se encuentra en una glándula situada en la piel del abdomen del *Moschus moschiferus*, cérvido de pequeña estatura que habita especialmente en Asia (Tonquín, Bengala, Rusia). El olor es debido a una cetona cíclica, la muscona.

El *ámbar gris*, masa obscura y amorfa, procede de una secreción patológica de los cachalotes debida a la irritación de su mucosa intestinal por ingestión de moluscos cefalópodos. Contiene un 82 % de ambarina y un 14 % de aceite de ámbar gris, que es el ingrediente activo. Se emplea como solución alcohólica.

Perfumes vegetales. Aceites esenciales. — Unas veces en estado sólido y otras en estado líquido, la esencia puede encontrarse en toda la planta (lavanda, menta, espliego), o localizada en algunas partes: raíz (iris, ajo, valeriana), madera (cedro, sándalo), hojas (geranio rosado), flores (rosa, violeta); en los frutos (naranja, limón, enebro); en el grano (anís), o, por último, en los jugos resinosos (tolú, trementina).



Fig. 36. — Extracción por arrastre con vapor de agua: alambique de laboratorio, reproducción en miniatura de los empleados industrialmente para obtener las esencias *(Fot. A. D. E. P.)*



Fig. 37. — Concentrador para la obtención de los aceites esenciales. Las esencias concretas son molidas en alcohol; el licor alcohólico que se obtiene así es filtrado y concentrado en un vacío parcial. Después de la operación, queda en el fondo del concentrador el aceite esencial, líquido viscoso, esencia floral pura *(Fot. A. D. E. P.)*

Otras veces, la esencia se forma solamente en el curso del tratamiento (mostaza), el cual suele consistir en una fermentación.

Los principios odoríficos contenidos en los aceites esenciales derivan en su mayoría de los terpenos, es decir, de los hidrocarburos de fórmula general $(C_5H_{10})_2$. Pueden ser ya hidrocarburos (terpenos propiamente tales): limonero, cedreno, pineno, santaleno, etc., ya alcoholes: linalol, geraniol, rodinol, ya aldehídos o cetonas: citral, irona. Las otras substancias odoríficas naturales pertenecen a la serie bencénica, como el timol y la vainillina. Finalmente, los almizcles de origen natural son substancias cíclicas con 16 ó 17 átomos de carbono en el ciclo.

Un perfume nunca está constituido por un producto puro, sino por una mezcla muy compleja de distintos constituyentes; de ahí la dificultad de determinar la constitución de los principales principios odoríficos o esencias y de reconstituir artificialmente el perfume exacto de una flor.

Extracción de los aceites esenciales. — Se utilizan cuatro métodos para extraer estos aceites. El primero es la expresión por presión: se aplica casi exclusivamente a las cáscaras de limones, naranjas y mandarinas. El segundo, o de arrastre con vapor de agua, consiste en hacer pasar el vapor a través de los productos que se tratan (*fig.* 36). La esencia es arrastrada y condensada junto con el vapor; como no se disuelve en el agua, se forman dos capas, lo cual permite separar la esencia. Este procedimiento es aplicado a las flores del naranjo, a los pétalos de rosa y a las hojas del geranio rosado. En el tercero, método de extracción por "maceración", las flores se muelen y maceran con grasa (de cerdo), a más de 70° C; la grasa disuelve la esencia. Una variante de este método, denominada *enflorado*, consiste en tratar las flores con grasas, pero a temperaturas más bajas; se utiliza para las flores en las cuales el perfume sigue produciéndose después de la recolección. Tanto en el caso de la maceración como en el del enflorado, las esencias se separan de la grasa por disolución en alcohol. Éste se evapora y se obtiene la esencia pura (*fig.* 37). El cuarto procedimiento consiste en extraer la esencia por medio de un disolvente volátil, generalmente éter de petróleo, que a continuación se evapora.

Tratamiento de las esencias. — Ciertos constituyentes de los aceites esenciales perjudican la finura del perfume, por lo que se eliminan cuando es posible. Se procede por destilación en vacío para separar los hidrocarburos terpénicos de las esencias de las cáscaras de naranja y limón. También puede procederse a una congelación fraccionada, o a lavados con hidróxido potásico, para eliminar ácidos libres o compuestos fenólicos. Se consigue eliminación de aldehídos y cetonas formando compuestos de solución con bisulfito sódico.

Con frecuencia se extrae también del aceite esencial un producto puro que puede utilizarse directamente (mentol de la esencia de menta) o emplearse como intermediario en la síntesis de otros perfumes (citral de la esencia de *lemon grass*).

Perfumes sintéticos. — Actualmente se producen muchos y muy variados perfumes sintéticos; unos son productos baratos, otros, por el contrario, tienen precios bastante elevados (almizcles sintéticos). Algunos reproducen exactamente la constitución de los productos naturales, como la ionona (violeta), la vainillina y la civetona; otros son totalmente diferentes de los productos naturales: almizcles nitrados, nitrobenceno (olor de almendras amargas), heptino carbonato de metilo (olor a hoja de violeta). Unos son semisintéticos, es decir, exigen como punto de partida para su fabricación un producto natural: la ionona es preparada a partir del citral; en la fabricación de otros no entran más que productos industriales.

Curtidos

Generalidades. Curtido vegetal. Extractos curtientes. Curtido al cromo. Operaciones de acabado. Curtido «glacé». Curtido de gamucería o curtido al aceite. Curtido húngaro. Peletería

Generalidades. — A partir de las pieles de los animales pueden obtenerse cueros fuertes, cueros finos o peletería. Estas pieles requieren una serie de tratamientos para hacerlas imputrescibles y para que adquieran suavidad, flexibilidad, etc.

Los cueros fuertes se obtienen por *curtido vegetal*, que tiene por objeto transformar la piel, tejido fibroso, en un compuesto imputrescible y tupido como es el cuero.

El *curtido vegetal* está basado en el empleo de taninos;

El *curtido al cromo* utiliza sales de cromo o cromatos;

El *curtido húngaro* se lleva a cabo con alumbre y sebo;

El *curtido de gamucería* consiste en una impregnación en aceite;

El *curtido "glacé"* se verifica con alumbre y yemas de huevo.

Las operaciones de acabado son los tratamientos del cuero curtido encaminados a darle flexibilidad.

Antes del curtido de las pieles, éstas requieren toda una serie de tratamientos previos.

Las pieles, sean frescas (verdes), o secas y saladas (las procedentes del extranjero), se reblandecen mediante un lavado con agua, según el procedimiento de la paleta —recipiente de madera cilíndrico provisto de una paleta—, o por el del noque batán (tambor cilíndrico rotatorio de madera).

Remojadas y limpias, las pieles se raspan con navajas embotadas para separar la carne que pudiera quedar (*descarnado* o raspado). A continuación sufren el *encalado* en unas cubas de madera u hormigón; al baño se añade sulfuro sódico o sulfuro de arsénico para facilitar la caída del pelo; esta operación se completa con un rascado a mano o a máquina *(desborrado)*. Seguidamente viene el proceso de impregnación con un mordiente o *desencalado*, que consiste en un tratamiento con sulfuro o cloruro amónicos para eliminar la cal, y otro con enzimas pancreáticas, cuya finalidad es la separación de algunas proteínas y la mejora del color del granulado.

Curtido vegetal. — Antes de sumergir las pieles en los caldos curtientes se tratan con ácido acético u otros ácidos orgánicos para eliminar cualquier resto de cal.

El curtido vegetal se hace por diferentes procedimientos: curtido en fosas o con casca, curtido rápido o en noques, o curtido combinado.

En el curtido con casca (corteza de roble) se colocan las pieles en fosas, en capas alternadas con el material curtiente triturado, y se empapan en un caldo ácido; finalmente, se cubre la fosa con material empleado en ocasiones anteriores. Entre la sexta y la décima semana se repite el proceso, colocando las capas en sentido inverso, y con material curtiente fresco, en otras fosas. Estos procesos se repiten hasta que el cuero esté curtido (suelen durar a veces algunos años).

De esta forma se tratan las pieles de los búfalos, bueyes, vacas, caballos y becerros.

Hoy, el curtido vegetal se hace de modo más rápido y homogéneo utilizando extractos curtientes y en unos bombos giratorios o noques; aun así, el proceso de curtido es bastante lento.

Extractos curtientes. — Los extractos curtientes se obtienen de materiales portadores de tanino, como cortezas de *encina*, *castaño* y *pinabete*, hojas de *zumaque*, bellotas de *mirobálano*, vainas de *tara*, madera de *quebracho* y *mimosa*. El material utilizado se reduce a polvo o a pequeños fragmentos y se espesa por maceración o por difusión.

Según el disolvente empleado, el tanino se denomina al agua, al alcohol o al éter.

Hay también *curtientes sintéticos*, obtenidos por condensación del formol con el fenol, el cresol o la naftalina (nerodol, ordonal, cormol) o por condensación del ácido sulfónico.

El curtido, fenómeno muy complicado y mal explicado aún, consiste principalmente en una reacción del tanino con las proteínas de la piel; aquél penetra a través de todos los tejidos, se fija en ellos y les comunica propiedades especiales. La marcha puede resumirse esquemáticamente por la reacción



$$\text{piel} + \text{tanino} \rightarrow \text{cuero} + \text{azúcar.}$$

Curtido al cromo. — Este curtido se efectúa ya con un baño a base de alumbre de cromo o de dicromato alcalino y glicerina, ya con dos baños, el primero a base de ácido crómico y el segundo con un reductor (tiosulfato) que destruye ese ácido. Seguidamente, se procede a unos lavados con agua.

En el curtido al cromo, las propiedades y composición del cuero obtenido, que es fino, están enormemente influidas por diversos factores tales como la concentración de sal, la temperatura, la agitación, el tiempo y la "afinidad" entre la proteína y el líquido de curtido.

Operaciones de acabado. — El cuero, después de curtido, queda ondulado e irregular, lo que hace necesario un tratamiento de acabado. Primero se ablanda sometiéndolo al *zurrado*; después se acuchilla con una máquina de cuchillas finas *(alisado)*. Frecuentemente, se sierra mediante un cuchillo en forma de cinta para darle el espesor deseado. Con el *abrillantado* se da al cuero un aspecto aterciopelado. Otras operaciones son el *chagrinado*, *aderezado*, *satinado*, *cepillado* y *alisado*.

Para la conservación del cuero se usan grasas vegetales y animales neutras que lo impermeabilizan e impiden que se seque excesivamente, lo que lo vuelve quebradizo, y le comunican flexibilidad, blandura y elasticidad. El *engrasado* puede realizarse a mano o en un tambor rotatorio.

También puede hacerse un *granulado* por impresión con unas calandrias de cilindros de acero grabados (cueros de marroquinería).



Trabajo del curtidor (Descripción de artes y oficios por la Real Academia Francesa de Ciencias)

Curtido «glacé». — En este tipo de curtido se evita la putrefacción de las pieles por un tratamiento con alumbre. Las pieles son sometidas a las mismas operaciones previas que en el curtido vegetal. Primero son tratadas con una mezcla de cal y oropimente para facilitar el depilado y eliminar las materias grasas; después se maceran en su propio zumaque para dilatar los poros.

Una vez efectuadas esas operaciones y tratadas las pieles con alumbre, se embadurnan con una mezcla de yemas de huevo y harina de trigo candeal. De esta forma se obtienen las pieles suaves y blancas utilizadas en guantería, zapatería de lujo, encuadernación, etc.

Curtido de gamucería o curtido al aceite. — Las pieles, humedecidas por los tratamientos anteriores, se abatanan con aceite —ordinariamente de hígado de bacalao o de linaza— durante cuatro horas en un noque giratorio, con lo cual el aceite se distribuye y penetra bien en la piel. Cuando se sacan del noque se apilan en capas para que empiecen a fermentar; después, se tienden o clavan, a fin de que prosiga el proceso de fermentación. Por último, se lavan con agua caliente alcalinizada y se prensan hidráulicamente para eliminar el exceso de grasa. Un lavado posterior, el pulimento y el secado completan las operaciones.

Curtido húngaro. — Este curtido se aplica a los cueros gruesos destinados a guarnicionería. Las pieles sufren una serie de tratamientos similares a los del curtido "glacé", aunque no hay que proceder con tanto cuidado; la mezcla de yemas de huevo y harina es substituida por el sebo.

Peletería. — La peletería es el curtido de las pieles de pelo. Así como en la fabricación del cuero se separa el pelo de la piel, en peletería se procura conservarlo siempre íntegramente. Las pieles son impregnadas de una substancia grasa (aceite de colza o de oliva, o manteca), abatanadas para que penetre totalmente la grasa, regadas y descarnadas, desengrasadas (removiéndolas en presencia de serrín de madera, arcilla, yeso, etc.), y finalmente sometidas a un lustrado para cubrir o eliminar toda clase de defectos, dar brillo a los pelos, uniformar su color y longitud, etc.

André GUILLEMONAT

BIBLIOGRAFÍA. — R. E. KIRK, D. F. OTHMER: *Encyclopedia of chemical Technology*; The interscience encyclopedia. Inc. New York, 1947-1960. — Dr. F. A. HENGLEIN: *Compendio de tecnología Química.* Manuel Marín, Barcelona, 1957. — R. MORRIS SHREVE: *Industrias del proceso químico.* Editorial Donat, Madrid, 1954. — L. LOSANA y J. M. FERRER MORERA: *Metalurgia.* Manuel Marín, Barcelona, 1957. — E. RIESENFELD: *Tratado de química inorgánica.* Manuel Marín, Barcelona, 1947. — L. F. FIESER y M. FIESER: *Química orgánica.* Editorial Atlante, México, 1948.

índice alfabético

A

B

C

CH

D

Impreso en los talleres gráficos de Sebastián de
Amorrortu e Hijos. Luca 2223, Buenos Aires.
IMPRESO EN LA ARGENTINA (*Printed in Argentine*)
Queda hecho el depósito que marca la ley Nº 11.723
Primera edición - B-14-7-73 - 7500 - 209766





